



TUGAS AKHIR - RE 141581

**KOMPARASI *RECOVERY* ALUMINIUM LUMPUR PDAM
X MENGGUNAKAN METODE ELEKTROLISIS DENGAN
MEMBRAN PENUKAR KATION DAN MEMBRAN
PENUKAR ANION**

*COMPARISON ALUMINIUM RECOVERY FROM DRINKING WATER
TREATMENT SLUDGE PDAM X USING ELECTROLYSIS WITH
CATION EXCHANGE MEMBRANE AND ANION EXCHANGE
MEMBRANE*

ADI PUSPITARINI AYU
0321144000019

Dosen Pembimbing
Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - RE 141581

**KOMPARASI *RECOVERY* ALUMINIUM
LUMPUR PDAM X MENGGUNAKAN METODE
ELEKTROLISIS DENGAN MEMBRAN PENUKAR
KATION DAN MEMBRAN PENUKAR ANION**

ADI PUSPITARINI AYU

032 1144 0000 019

Dosen Pembimbing :

Arseto Yekti Bagastyo ST.,MT.,M.Phill.,P.hD

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - RE 141581

***COMPARISON ALUMINIUM RECOVERY
FROM DRINKING WATER TREATMENT
SLUDGE PDAM X USING ELECTROLYSIS
WITH CATION EXCHANGE MEMBRANE AND
ANION EXCHANGE MEMBRANE***

ADI PUSPITARINI AYU

032 1144 0000 019

Supervisor :

Arseto Yekti Bagastyo ST.,MT.,M.Phill.,P.hD

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil Environmental % Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

LEMBAR PENGESAHAN

KOMPARASI *RECOVERY* ALUMINIUM LUMPUR PDAM X MENGUNAKAN METODE ELEKTROLISIS DENGAN MEMBRAN PENUKAR KATION DAN MEMBRAN PENUKAR ANION

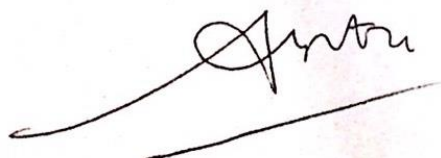
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ADI PUSPITARINI AYU
NRP. 03211440000019

Disetujui Oleh Pembimbing Tugas Akhir



Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil.P.hD
NIP. 19620604 200501 1 001



KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan pada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Komparasi *Recovery* Aluminium Lumpur PDAM X Menggunakan Metode Elektrolisis dengan Membran Penukar Kation dan Membran Penukar Anion”. Atas bimbingan dan pengarahan yang telah diberikan hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, saya menyampaikan terima kasih kepada,

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas motivasi, kesabaran serta bimbingan yang telah diberikan.
2. Ibu Prof. DR. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc., Ibu Ipung Fitri Purwanti, ST., MT., P.hD., dan Bapak Welly Herumurti, ST., M.Sc. selaku dosen penguji tugas akhir, terima kasih atas saran serta bimbingannya.
3. Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITS dengan program Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT), terima kasih atas dukungan dana sehingga penelitian ini dapat terlaksana.
4. Ibu Toeti Wahyoe Widiastuti beserta Bapak dan Ibu staf PDAM X, terima kasih atas waktu dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan penelitian.
5. Keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa untuk kelancaran tugas akhir saya.
6. Bapak Hadi Sutrisno , Ibu Hurun In dan Ibu Mery selaku laboran Teknik Lingkungan yang senantiasa membantu dan memfasilitasi ketika di laboratorium.
7. Bapak dan Ibu laboran Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil ITS dan Laboratorium Mikroorganisme Departemen Kimia ITS.
8. Teman-teman angkatan 2014, 2015 dan 2016 yang selalu memberikan semangat dan siap dalam membantu.
9. Rizky Amaliya Barakwan beserta rekan-rekan asisten Laboratorium Elektrokimia Departemen Teknik Kimia ITS, terima kasih atas segala ilmu dan pendampingan selama penelitian berlangsung.

Saya menyadari masih banyak kekurangan dalam

penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu saya menerima saran agar penulisan laporan tugas akhir ini menjadi lebih baik. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

KOMPARASI *RECOVERY* ALUMINIUM LUMPUR PDAM X MENGGUNAKAN METODE ELEKTROLISIS DENGAN MEMBRAN PENUKAR KATION DAN ANION

Nama : Adi Puspitarini Ayu
NRP : 0321 440 000 019
Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M. Phil., PhD

ABSTRAK

Kadar aluminium pada lumpur PDAM Kota Surabaya diketahui sebesar 47,5% berpotensi untuk dilakukan *recovery*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik lumpur alum hasil pengolahan PDAM X, menentukan jarak elektroda optimum serta penggunaan Anion Exchange Membrane (AEM), Cation Exchange Membrane (CEM), dan tanpa penggunaan membran untuk meningkatkan efisiensi *recovery*.

Lumpur alum PDAM mengandung kadar air 99,08 $\pm 0,01$ %, *Volatiled Solids* 1.733 $\pm 4,05$ mg.L⁻¹, *Total Dissolved Solids* (TDS) 352,7 $\pm 1,54$ mg.L⁻¹, pH 7,46 $\pm 0,01$, alkalinitas 70,8 $\pm 7,21$ mg.L HCO₃⁻, COD 9.666,6 $\pm 11,54$ mg.L⁻¹, BOD₅ 1.443,5 $\pm 17,33$ mg.L⁻¹, Logam Al 126.100 mg.L⁻¹, Logam Fe 55.400 mg.L⁻¹, Logam Cu 59 mg.L⁻¹, dan Logam Cr 23 mg.L⁻¹

Proses elektrolisis dapat dioptimalkan dengan penggunaan membran CEM maupun membran AEM. Kation yang berada pada sampel akan melewati membran CEM menuju katoda. Sementara pada penggunaan membran AEM, hanya anion yang bisa melewati membran, sehingga proses reduksi kation dapat lebih optimal.

Penelitian pendahuluan yang dilakukan adalah asidifikasi dengan pH 3. Parameter yang dianalisis untuk penelitian ini adalah pH, tegangan listrik, *Chemical Oxygen Demand* (COD). Jenis material elektroda yang digunakan adalah perak sebagai katoda dan karbon sebagai anoda. Penelitian dilakukan dengan waktu operasi 10 jam, kuat arus hasil uji polarisasi sebesar 300 mA dengan volume operasi adalah 1L. Variasi jarak antar elektroda sebesar 0,2 cm ; 0,7 cm ; dan 1 cm.

Dari keseluruhan uji variasi dengan reaktor diketahui konfigurasi dengan membran AEM dan jarak elektroda 1 cm adalah hasil yang optimum. Hal tersebut dikarenakan dengan mekanisme ini, dapat *merecover* sebanyak 76%. Penggunaan membran AEM dengan jarak elektroda 1 cm juga dapat memaksimalkan energi untuk reduksi sebesar 46%.

Kata kunci: Aluminium, Anion Exchange Membrane, Asidifikasi, Cation Exchange Membrane, dan Elektrolisis.

Halaman sengaja dikosongkan

**COMPARISON ALUMINIUM RECOVERY FROM DRINKING WATER TREATMENT
SLUDGE PDAM X USING ELECTROLYSIS WITH CATION EXCHANGE MEMBRANE
AND ANION EXCHANGE MEMBRANE**

Name : Adi Puspitarini Ayu
Register Number : 0321 440 000 019
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M. Phil., PhD

ABSTRACT

Water Treatment Plant (WTP) in Surabaya produced drinking water treatment sludge consist of 47,5% aluminium. This percentage is able to do recovery aluminium. This research was conducted for characterization of drinking water treatment sludge from PDAM X, to determine interelectrode gaps and ion exchange membrane used to increase the recovery efficiency.

Alum sludge was contain of water contain 99,08 $\pm 0,0056$ %, *Sludge Volume Index* $114,18 \pm 1,97$ mL.g⁻¹, *Volatiled Solids* $1.733 \pm 4,05$ mg.L⁻¹, *Total Dissolved Solids* (TDS) $352,7 \pm 1,54$ mg.L⁻¹, pH $7,46 \pm 0,0047$, alkalinity $70,8 \pm 7,21$ mg.L HCO₃⁻, COD $9.666,6 \pm 11,54$ mg.L⁻¹, BOD₅ $1.443,5 \pm 17,33$ mg.L⁻¹, concentraion of Al 126.100 mg.L⁻¹, concentraion of Fe 55.400 mg.L⁻¹, concentraion of Cu 59 mg.L⁻¹, dan concentraion of Cr 23 mg.L⁻¹

AEM and CEM used to optimize electrolysis efficiency. The cation of the sample will through CEM membran to cathode. Meanwhile, using AEM membran only allows anion to through to anode. That mechanism can optimize process because it just selected cation around the cathode

Alum sludge was taken from clearator unit PDAM X. Preliminary research was \acidification process of dry solids with sulphuric acid in pH 3 using magnetic stirrer and separated using centrifuge to get supernatant. This experiment using acrylic as reactor and it size was 20,2 cm x 5 cm x 1 cm. Silver is used as cathode while carbon was used as anode. Electrolytic mechanism need 10 hours and 300 mA. This experiment was batch with recirculation. Interelectrode that used in this experiment was 0,2 cm ; 0,7 cm ; and 1 cm.

As a result, configuration using AEM and interelectrode gaps 1 cm gave the best recovery performance. AEM can recover 76% aluminium. Interelectrode gaps affected energy consumption that used for reduction or oxidation. In 1 cm interelectrode gaps, we know that 46% electrical force was use for reduction.

Keywords: Aluminium, Anion Exchange Membrane, Acidification, Cation Exchange Membrane, dan Electrolysis.

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB 2	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penggunaan Alum pada Pengolahan Air Minum	5
2.2. Aluminium	6
2.3. Teknik <i>Recovery</i> Aluminium	6
2.4. Teknologi Asidifikasi	7
2.5. Teknologi Elektrolisis	7
2.5.1. Mekanisme Elektrolisis	7
2.5.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi	9
2.5.3. Elektrolisis dengan Membran	11
2.6. Karakteristik <i>Anion Exchange Membrane</i>	12
2.7. Karakteristik <i>Cation Exchange Membrane</i>	14
2.8. Mobilisasi Ion Logam	14
2.9. Perhitungan Efisiensi Proses	15
2.10. Penelitian Terdahulu	17
BAB 3	19
METODE PENELITIAN	19
3.1. Deskripsi Umum	19
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian	19
3.3. Kerangka Penelitian	19
3.4. Penentuan Variabel dan Parameter	23
3.4.1 Jarak elektroda	23
3.4.2 Penggunaan Membran pada Reaktor	23

3.5.	Persiapan Alat dan Bahan	32
3.6.	Pengambilan Sampel Lumpur PDAM	35
3.6	Karakterisasi Lumpur PDAM.....	36
3.7	Penelitian Pendahuluan	37
3.7.1	Persiapan Sampel Lumpur	37
3.7.2	Pelarutan dengan Asam.....	38
3.7.3	Sentrifugasi	38
3.7.4	Uji Polarisasi	38
3.8	Penelitian Utama.....	39
3.8	Analisis Data dan Pembahasan.....	44
BAB 4	47
HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Karakterisasi Lumpur PDAM X	47
4.1.1.	Karakteristik Fisik Lumpur.....	47
4.1.2.	Karakteristik Kimiawi Lumpur.....	48
4.1.3.	Kandungan Organik pada Lumpur	48
4.1.4.	Kandungan Logam pada Lumpur	49
4.2	Penelitian Pendahuluan	49
4.2.1.	Pengeringan Lumpur PDAM	49
4.2.2.	Proses Asidifikasi dan Sentrifugasi Sampel.....	49
4.2.3.	Uji Polarisasi Elektroda	51
4.3	Penelitian Utama.....	53
4.3.1.	Hasil Proses Elektrolisis.....	54
4.3.2.	Tanpa Membran.....	54
4.3.3.	Cation Exchange Membrane	58
4.3.4.	Anion Exchange Membrane.....	63
4.3.5.	Massa TDS Tersisihkan	67
4.4	Presentase Komposisi Logam	72
4.5	Perhitungan <i>Kesetimbangan Massa</i>	75
4.6	Kebutuhan Energi	79
4.7	Komparasi Konfigurasi Optimum	86
4.8	Penentuan Waktu Pengendapan	87
4.9	Aplikasi <i>Recovery</i> Aluminium.....	88
BAB 5	93

KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1 Kesimpulan	93
5.2 Saran	93
DAFTAR PUSTAKA.....	95
LAMPIRAN A	105
PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM	105
LAMPIRAN B	109
HASIL ANALISIS	109
LAMPIRAN C	149
DOKUMENTASI PENELITIAN	149
BIOGRAFI PENULIS	151

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Teknis Membran CEM.....	26
Tabel 3. 2 Spesifikasi Teknis Membran AEM.....	29
Tabel 3. 3 Alat dan Kegunaan	32
Tabel 3. 4 Parameter Penelitian	36
Tabel 3. 5 Variabel Penelitian.....	39
Tabel 3. 6 Kebutuhan Sampel	41
Tabel 4. 1 Karakterisasi Lumpur PDAM X.....	47
Tabel 4. 2 Hasil Uji TOC	84
Tabel 4. 3 Komparasi Penggunaan Membran.....	86
Tabel 4. 4 Berat dan Volume Lumpur PDAM X.....	89

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Serbuk Aluminium PDAM	5
Gambar 2. 2 Aluminium dari Bauksit Alam	6
Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Elektrolisis	8
Gambar 2. 4 Kelarutan Logam Berat sebagai Fungsi pH	10
Gambar 2. 5 Kelarutan Al^{3+} , DOC dan pH	10
Gambar 2. 6 Kombinasi <i>Anion Exchange Membrane</i> dan Elektrolisis	12
Gambar 2. 7 (a) Permukaan AMI-7001S (b) Penampang AMI-700S	13
Gambar 2. 8 (a) Permukaan CMI-7001S (b) Penampang CMI-701S	14
Gambar 2. 9 Kelarutan aluminium kompleks pada pH tertentu	15
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	22
Gambar 3. 2 Reaktor Tanpa Membran	24
Gambar 3. 3 Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran	25
Gambar 3. 4 Reaktor dengan Membran CEM	27
Gambar 3. 5 Konfigurasi Reaktor dengan Membran CEM	28
Gambar 3. 6 Reaktor dengan Membran AEM	30
Gambar 3. 7 Konfigurasi Reaktor dengan Membran AEM	31
Gambar 4. 1 Rasio Kelarutan Logam-logam dalam pH	50
Gambar 4. 2 Uji Polarisasi pada 0-6 Volt	52
Gambar 4. 3 Uji Polarisasi pada 6-9 Volt	52
Gambar 4. 4 Fluktuasi nilai pH pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran	55
Gambar 4. 5 Fluktuasi nilai TDS dan Tegangan Listrik pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran	57
Gambar 4. 6 Fluktuasi nilai pH pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran	59
Gambar 4. 7 Fluktuasi nilai TDS dan Tegangan Listrik pada Konfigurasi Reaktor Membran CEM	62
Gambar 4. 8 pH dan tegangan listrik pada penggunaan AEM	64
Gambar 4. 9 pH dan tegangan listrik pada penggunaan AEM	66
Gambar 4. 10 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 1 cm	68
Gambar 4. 11 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 0,7cm	68
Gambar 4. 12 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 0,2cm	68
Gambar 4. 13 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 1 cm	69
Gambar 4. 14 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 0,7 cm	69
Gambar 4. 15 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 0,2 cm	69
Gambar 4. 16 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran AEM Jarak 1	70

Gambar 4. 17 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran AEM Jarak 0,7 cm.....	71
Gambar 4. 18 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran AEM Jarak 0,2 cm.....	71
Gambar 4. 19 Kandungan Logam pada Konfigurasi Tanpa Membran	73
Gambar 4. 20 Kandungan Logam pada Konfigurasi Membran CEM ..	73
Gambar 4. 21 Kandungan Logam pada Konfigurasi Membran AEM ..	74
Gambar 4. 22 Kesetimbangan Massa Al Konfigurasi Tanpa Membran	76
Gambar 4. 23 <i>Kesetimbangan Massa Al</i> pada Konfigurasi CEM.....	77
Gambar 4. 24 Kesetimbangan Massa Al Konfigurasi AEM	78
Gambar 4. 25 Penyisihan COD dan padatan aluminium pada konfigurasi tanpa membran	79
Gambar 4. 26 Penyisihan COD dan berat katoda dengan CEM	80
Gambar 4. 27 Penyisihan COD dan berat katoda dengan AEM	81
Gambar 4. 28 ICE reduksi masing masing variasi	82
Gambar 4. 29 ICE oksidasi COD masing masing variasi	83
Gambar 4. 30 ICE oksidasi organik	85
Gambar 4. 31 Waktu Pengendapan Aluminium	88
Gambar 4. 32 Skema Skala <i>Pilot</i>	90
Gambar 4. 33 Contoh Alat Elektrodialisis	91

DAFTAR LAMPIRAN

Prosedur Analisis Laboratorium	105
Lampiran B Tabel 1, 1 Karakterisasi Lumpur.....	97
Lampiran B Tabel 2. 1 Nilai TDS Dan pH Konfigurasi Tanpa Membran Jarak 1 Cm	100
Lampiran B Tabel 2. 2 Nilai TDS Dan pH Konfigurasi Tanpa Membran Jarak 0,7 Cm	101
Lampiran B Tabel 2. 3 Nilai TDS Dan pH Konfigurasi Tanpa Membran Jarak 0,2 Cm	102
Lampiran B Tabel 2. 4 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 1 Cm	103
Lampiran B Tabel 2. 5 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 1 Cm	104
Lampiran B Tabel 2. 6 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 0,7 Cm	105
Lampiran B Tabel 2. 7 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 0,7 Cm	106
Lampiran B Tabel 2. 8 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 0,2 Cm	107
Lampiran B Tabel 2. 9 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran CEM Jarak 0,2 Cm	108
Lampiran B Tabel 2. 10 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 1 Cm	109
Lampiran B Tabel 2. 11 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 1 Cm	110
Lampiran B Tabel 2. 12 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 0,7 Cm	111
Lampiran B Tabel 2. 13 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 0,7 Cm	112
Lampiran B Tabel 2. 14 Nilai TDS Dan pH Katoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 0,2 Cm	113

Lampiran B Tabel 2. 15 Nilai TDS Dan pH Anoda Konfigurasi Membran AEM Jarak 0,2 Cm	114
Lampiran B Tabel 3. 1 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi AEM 1cm	116
Lampiran B Tabel 3. 2 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi AEM 1cm	116
Lampiran B Tabel 3. 3 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi AEM 1cm	116
Lampiran B Tabel 3. 4 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi CEM 1cm	117
Lampiran B Tabel 3. 5 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi CEM 1cm	117
Lampiran B Tabel 3. 6 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Katoda CEM 1cm	117
Lampiran B Tabel 3. 7 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Anoda CEM 1cm	117
Lampiran B Tabel 3. 8 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi Tanpa Membran 1 Cm	118
Lampiran B Tabel 3. 9 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi Tanpa Membran 1cm	118
Lampiran B Tabel 3. 10 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Tanpa Membran 1cm	118
Lampiran B Tabel 3. 11 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi Tanpa Membran 0,7 Cm	119
Lampiran B Tabel 3. 12 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi Tanpa Membran 0,7 Cm	119
Lampiran B Tabel 3. 13 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Tanpa Membran 0,7 Cm	119
Lampiran B Tabel 3. 14 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi Tanpa Membran 0,2 Cm	119
Lampiran B Tabel 3. 15 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi Tanpa Membran 0,2 Cm	120
Lampiran B Tabel 3. 16 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Tanpa Membran 0,2 Cm	120
Lampiran B Tabel 3. 17 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi AEM 0,7cm	120
Lampiran B Tabel 3. 18 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi AEM 0,7cm	120

Lampiran B Tabel 3. 19 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi AEM 0,7cm	121
Lampiran B Tabel 3. 20 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi CEM 0,7 Cm	121
Lampiran B Tabel 3. 21 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi CEM 0,7 Cm	121
Lampiran B Tabel 3. 22 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Katoda CEM 0,7 Cm	121
Lampiran B Tabel 3. 23 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Anoda CEM 0,7 Cm	122
Lampiran B Tabel 3. 24 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi CEM 0,2 Cm	122
Lampiran B Tabel 3. 25 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi CEM 0,2 Cm	122
Lampiran B Tabel 3. 26 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Katoda CEM 0,2 Cm.....	122
Lampiran B Tabel 3. 27 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi Anoda CEM 0,2 Cm.....	123
Lampiran B Tabel 3. 28 Hasil Analisis ICP Elektroda Konfigurasi AEM 0,7 Cm	123
Lampiran B Tabel 3. 29 Hasil Analisis ICP T ₀ Konfigurasi AEM 0,2 Cm	123
Lampiran B Tabel 3. 30 Hasil Analisis ICP T ₁₀ Konfigurasi AEM 0,2 Cm	123
Lampiran B Tabel 3. 31 Massa Proses Elektrolisis.....	126
Lampiran B Tabel 3. 32 <i>Recovery</i> Al Pada Seluruh Fase ..	131
Lampiran B Tabel 4. 1 Massa COD Pada Konfigurasi CEM 1 Cm Pada Anoda	130
Lampiran B Tabel 4. 2 Massa COD Pada Konfigurasi CEM 0,7 Cm Pada Anoda	130
Lampiran B Tabel 4. 3 Massa COD Pada Konfigurasi CEM 0,2 Cm Pada Anoda	131
Lampiran B Tabel 4. 4 Massa COD Pada Konfigurasi Tanpa Membran 1 Cm	131
Lampiran B Tabel 4. 5 Massa COD Pada Konfigurasi Tanpa Membran 0,7 Cm	132
Lampiran B Tabel 4. 6 Massa COD Pada Konfigurasi Tanpa Membran 0,2 Cm...132	132
Lampiran B Tabel 5. 1 ICE Reduksi Aluminium	146

Lampiran B Tabel 5. 2 ICE Oksidasi dengan TOC	146
Lampiran B Tabel 5. 3 ICE Oksidasi dengan TOC	147
Dokumentasi Penelitian.....	136
Lampiran C Gambar 1. 1 (a) Pengambilan sampel lumpur PDAM X. (b) Pengeringan Lumpur (c) Penumbukkan dan Pengayakan	136
Lampiran C Gambar 1. 2 (d) Pemberian H ₂ SO ₄ dengan pH3 (e) Proses Asidifikasi dengan <i>Magnetic Stirer</i> (f) Proses Sentrifugasi Sampel	136
Lampiran C Gambar 1. 3 Pengoperasian Reaktor Elektrolisis dengan membran AEM.....	137
Lampiran C Gambar 1. 4 (g) Membran AEM setelah Operasi (h) Analisis COD (i) Katoda setelah Operasi	137

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PDAM menggunakan alum untuk proses koagulasi (Rifa'i, 2007). Menurut Babatunde *et al.* (2009), $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$, FeCl_3 , or $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ banyak digunakan sebagai koagulan untuk menghilangkan kandungan partikulat dan bahan terlarut dari air baku. Ippolito *et al.* (2011) menjelaskan bahwa pengolahan air minum menghasilkan lumpur yang disebut *Water Treatment Residual (WTR)* dan banyak mengandung presipitat Al^{3+} dan Fe^{3+} . Hovsepyan (2009) juga menemukan bahwa pengolahan air minum menghasilkan lumpur yang mengandung aluminium dan beberapa ion. Menurut Nurcahyo *et al.* (2014), alum yang digunakan untuk koagulan, terdiri dari aluminium yang terdapat pada bauksit di alam dan direaksikan dengan asam sulfat. PDAM X masih menghasilkan lumpur yang mengandung aluminium.

Berdasarkan hasil penelitian Suherman (2005), lumpur PDAM memiliki kandungan Al^{+3} sebesar 23%. Kisnawati (2016) menyatakan kandungan Al^{3+} pada bauksit di Indonesia adalah 24%. Menurut Lewis (1990) kandungan logam aluminium dari pemakaian aluminium sulfat sebagai koagulan untuk pengolahan air minum pada PDAM tergolong sebagai limbah yang harus diolah terlebih dahulu sebelum dikembalikan ke lingkungan. Menurut Guyton (1996), dampak paparan aluminium bagi kesehatan manusia dapat terjadi melalui makanan, pernapasan, dan kontak dengan kulit. Apabila terkena kulit akan menyebabkan tersumbatnya pori-pori kulit dan menyebabkan kulit tidak bisa mengeluarkan racun secara alami. Fitri (2013) mengatakan bahwa PDAM belum melakukan pengolahan terhadap lumpur hasil pengolahan air minum. Lumpur hasil pengolahan air minum dapat menjadi produk olahan yang memiliki nilai ekonomis dan merupakan produk potensial (Razif, 2003).

Sengupta *et al.* (2002) mengatakan bahwa mekanisme konvensional untuk melakukan *recovery* lumpur alum adalah dengan pengeringan lumpur hasil pengolahan air minum dan melakukan asidifikasi. Cui *et al.* (2017) menyatakan bahwa *recovery* aluminium merupakan topik yang penting dan menarik untuk dibahas. Beberapa teknologi yang sudah ditemukan pada penelitian terdahulu untuk melakukan *recovery* aluminium dari lumpur alum, diantaranya adalah asidifikasi, pemisahan kimia dengan membran, pengolahan dengan basa. Diaz *et al.* (2014) menyatakan bahwa solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan pengolahan lumpur adalah dengan *recovery* aluminium dari lumpur. Hal tersebut untuk mengurangi volume lumpur yang ditimbun dan dimanfaatkan kembali ion logam aluminium tersebut.

Dalam penelitiannya, Hovsepyan (2009) menemukan bahwa untuk *recovery* alum pada limbah lumpur adalah dengan menaikkan persentase solid dari 5% menjadi 20%. Kemudian dilakukan asidifikasi dengan asam sulfat, pemisahan filtrat dan sedimen, penyisihan warna, filtrasi, evaporasi dan kristalisasi. Cundari *et al.* (2016) mengatakan bahwa proses asidifikasi sebagai teknologi pengurangan dan pemanfaatan lumpur keluaran unit pengolahan air sudah cukup lama dikenal. Asidifikasi dilakukan dengan menambahkan asam pada lumpur hingga mencapai pH 3. Tujuan dari asidifikasi adalah untuk melarutkan kembali logam aluminium yang terkandung dalam lumpur keluaran pengolahan air minum PDAM. Xu *et al.* (2009) melakukan penelitian untuk penyisihan aluminium dengan metode elektrolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai efisiensi penyisihan aluminium dipengaruhi oleh pH dan lebih maksimal jika dilakukan asidifikasi pada lumpur pada pH 3.

Menurut Widodo *et al.* (2010), elektrolisis adalah mekanisme untuk pemisahan ion logam yang sering diaplikasikan karena hasil lebih murni dan tidak banyak menggunakan reagen kimia. Jime'nez *et al.* (2007) melakukan penelitian terhadap *recovery* aluminium dengan mekanisme elektrolisis dan mendapati aluminium hasil

recovery sebesar 30%. Proses elektrolisis membutuhkan elektroda yang digunakan sebagai tempat berlangsungnya reduksi dan oksidasi. Elektroda yang digunakan umumnya merupakan elektroda inert, seperti perak (Ag), platina (Pt), dan emas (Au) (Setiawan, 2013). Proses elektrolisis dapat dioptimalkan dengan penggunaan teknologi membran.

Varcoe *et al.* (2014) melakukan riset terkait penggunaan membran *Anion Exchange Membrane* pada proses elektrolisis, ditemukan bahwa penggunaan membran dapat memaksimalkan mekanisme reduksi dan oksidasi. Onorato *et al.* (2017) menyatakan bahwa beberapa senyawa kimia yang dapat mengganggu kinerja *Anion Exchange Membrane (AEM)* adalah surfaktan dan protein ataupun beberapa senyawa kimia lain. *Cation Exchange Membrane (CEM)* adalah ion kalsium dan turunan maupun senyawa yang mengandung kalsium dan magnesium hidroksida ataupun kalsium karbonat yang dapat memberikan pengaruh pada struktur morfologi membran. Menurut Yulianto *et al.* (2009), kuat arus merupakan faktor yang penting dalam elektrolisis. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik lumpur alum PDAM, menentukan konfigurasi optimum serta jarak elektroda optimum untuk proses elektrolisis.

1.2. Perumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimiawi lumpur alum hasil pengolahan air minum PDAM X?
2. Bagaimana konfigurasi elektrolisis untuk *recovery* aluminium optimum dengan membran AEM, CEM, elektroda Ag, dan karbon?
3. Berapakah jarak elektroda optimum untuk pemisahan senyawa aluminium dari lumpur dengan metode elektrolisis?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menentukan karakteristik lumpur alum hasil pengolahan air minum PDAM X.
2. Menentukan konfigurasi elektrolisis untuk *recovery* aluminium optimum dengan menggunakan membran AEM, CEM, tanpa membran elektroda Ag, dan karbon.

3. Menentukan jarak elektroda optimum untuk pemisahan senyawa aluminium dari lumpur dengan metode elektrolisis.

1.4. Ruang Lingkup

1. Limbah lumpur yang digunakan sebagai sampel adalah limbah lumpur dari PDAM X.
2. Waktu *sampling* pada bulan Februari Tahun 2018
3. Pembuatan reaktor elektrolisis dilakukan dalam skala laboratorium
4. Percobaan dilakukan dengan proses *batch* dengan resirkulasi
5. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS, Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil ITS, dan Laboratorium Mikroorganisme Departemen Kimia ITS.

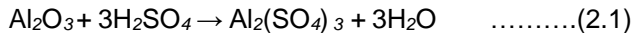
1.5. Manfaat Penelitian

- Memberikan informasi ilmiah tentang alternatif teknologi untuk mengolah limbah lumpur hasil pengolahan air minum.
- Memberikan teknologi *recovery* sumber daya logam Al yang tidak dapat diperbarui.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penggunaan Alum pada Pengolahan Air Minum

Proses pengolahan air yang digunakan di PDAM menghasilkan lumpur yang berasal dari setiap tahapan pada proses pengendapan flok-flok pada air. Endapan tersebut terjadi karena adanya penambahan tawas [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$]. Nurcahyo *et al.* (2014) menjelaskan bahwasanya senyawa aluminium sulfat terbuat dari alumina (Al_2O_3) yang berupa bauksit dari tambang kemudian dimasukkan ke dalam asam sulfat yang panasnya mendekati titik didih alumina. Reaksi antara alumina dan asam sulfat dapat ditulis secara empiris sebagai berikut:



Mizwar dan Amalia (2012) menyatakan bahwa proses pengolahan air pada suatu instalasi pengolahan air (IPA) selain menghasilkan air bersih juga menghasilkan limbah lumpur yang umumnya dibuang ke badan air. Hal ini dapat menyebabkan akumulasi konsentrasi aluminium dalam air, organisme air dan tubuh manusia yang kemudian dapat menyebabkan penyakit alzheimer dan keterbelakangan mental anak-anak. Beberapa metode pengolahan lumpur pengolahan air misalnya, *sewage, pipelines system, mud containing system, land aplication*, dan *landfilling* telah umum digunakan. Namun semua teknik tersebut tidak merubah komposisi kimia dalam lumpur.



Gambar 2. 1 Serbuk Aluminium PDAM
Sumber : Liani *et al.*, 2004

2.2. Aluminium

Aluminium merupakan logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di dunia, dengan pemakaian tahunan sekitar 24 juta ton (ASM International, 1990). Rahmawati (2010) menyatakan bahwa aluminium dengan densitas $2,7 \text{ g/cm}^3$. Aluminium merupakan logam ringan yang tahan terhadap korosi, kuat, dan mudah didapat.

Menurut Lewis (1990), aluminium adalah logam yang bervalensi 3 dan bersifat amfoterik. Amfoterik adalah sifat bahan kimia yang dapat bersifat sebagai reduktor maupun oksidator dalam reaksi. Bauksit merupakan bijih utama pembentuk aluminium dimana komposisinya berupa senyawa oksida dari aluminium yaitu $\text{Al}(\text{OH})_3$.



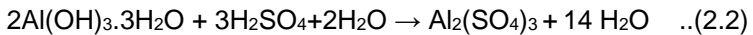
Gambar 2. 2 Aluminium dari Bauksit Alam

**Sumber :Tim Analisa dan Evaluasi Komoditi Mineral
Internasional Proyek Pengembangan Pusat Informasi Mineral,
1984**

2.3. Teknik *Recovery* Aluminium

Recovery lumpur pengolahan air minum membawa banyak dampak positif baik bagi lingkungan maupun ekonomi dan finansial (Babatunde, 2007). Menurut Shi (1992), lumpur hasil pengolahan koagulasi dan flokulasi alum memiliki rumus kimia $2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. *Recovery* alum secara konvensional adalah proses asidifikasi dengan penambahan asam sulfat. Penambahan asam sulfat berfungsi untuk mengekstrak aluminium serta logam-logam lain yang terdapat pada lumpur. Asam sulfat juga digunakan untuk mengekstrak ion aluminium karena tidak mengakibatkan *proton jumping*. *Proton jumping* adalah proses dimana proton

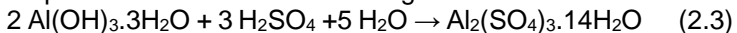
berdifusi melalui jaringan ikatan hidrogen melalui pembentukan ikatan kovalen sehingga dapat mengganggu proses reduksi kation (Roberts dan Roddy, 1960). Reaksi kimia yang berlangsung pada proses ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Elektrolisis adalah penguraian larutan elektrolit oleh arus listrik yang digunakan untuk pemisahan ion-ion logam dengan reaksi reduksi oksidasi (Abou-Shady *et al.*, 2012). Prakash *et al.*, (2004) menemukan bahwa untuk mengoptimalkan elektrolisis, diperlukan teknologi membran. Teknologi dapat optimal digunakan apabila mendapat energi potensial melalui proses elektrokimia karena dapat mengurangi pengaruh adanya zat organik pada sampel lumpur.

2.4. Teknologi Asidifikasi

Ewida *et al.* (2008) melakukan asidifikasi lumpur alum dengan asam sulfat pada pH antara 1-4 dan dapat menghasilkan *recovery* alum sebesar 70-90%. Konsentrasi alum *recovery* diukur berdasarkan konsentrasi Al yang terkandung dalam filtrat hasil asidifikasi. Menurut Irfan (2007), kinerja alum *recovery* dalam menurunkan tingkat kekeruhan air baku terbukti sama baiknya dengan alum baru. Sengupta (2002) menyatakan pada PATENT 6,495,047 B1, bahwasanya langkah asidifikasi diperlukan untuk mengekstrak aluminium yang ada pada lumpur. Stokiometri dari proses asidifikasi adalah sebagai berikut :



2.5. Teknologi Elektrolisis

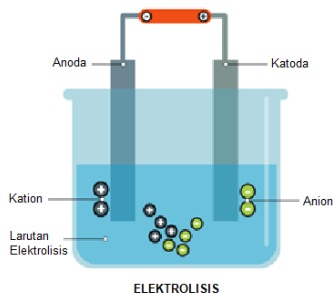
2.5.1. Mekanisme Elektrolisis

Elektrolisis dapat digunakan untuk memisahkan logam. Kelebihan elektrolisis yaitu logam yang diperoleh memiliki kemurnian tinggi, prosesnya sederhana (Asyari, 2012). Chang (2005) menyatakan bahwa banyaknya produk yang terbentuk bergantung pada kualitas arus listrik yang ditransfer pada elektroda. Mekanisme perpindahan

elektron pada proses elektrolisis adalah dengan reaksi reduksi dan oksidasi (redoks). Reaksi redoks merupakan proses penangkapan dan pelepasan elektron. Reaksi redoks terjadi pada elektroda, yang disebut anoda dan katoda (Setiawan, 2013).

Menurut Sopiah (2008), Kutub negatif sumber arus dari DC mengarah pada katoda karena memerlukan elektron dan kutub positif sumber arus pada anoda. Katoda bermuatan negatif akan menarik kation yang akan tereduksi menjadi endapan logam. Sebaliknya, anoda bermuatan positif dan menarik anion-anion yang akan teroksidasi menjadi gas. Ilustrasi reaktor elektrolisis dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.

- **Anoda**
Anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi. Pelepasan elektron dari larutan ke elektroda berlangsung selama reaksi oksidasi terjadi
Reaksi $A_{red} \rightarrow A_{oks} + ne^-$
Contoh $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^-$
- **Katoda**
Katoda merupakan tempat terjadinya reduksi.. Pelepasan elektron dari larutan ke elektroda berlangsung selama reaksi oksidasi terjadi
Reaksi $B_{oks} + ne^- \rightarrow B_{red}$
Contoh $Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$
(Syukri, 1999)



Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Elektrolisis
Sumber : Sopiah,2008

2.5.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi

Menurut (Ahmad, 1992), terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses elektrolisis. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses elektrolisis antara lain:

- DC supply

Huang *et al.* (2007) menyatakan bahwa DC (*Direct Current*) adalah cara yang efektif untuk mempercepat perpindahan kation dan anion menuju katoda dan anoda. Kecepatan perpindahan ion ini dapat diatur dengan variabel kuat arus.

- Elektroda

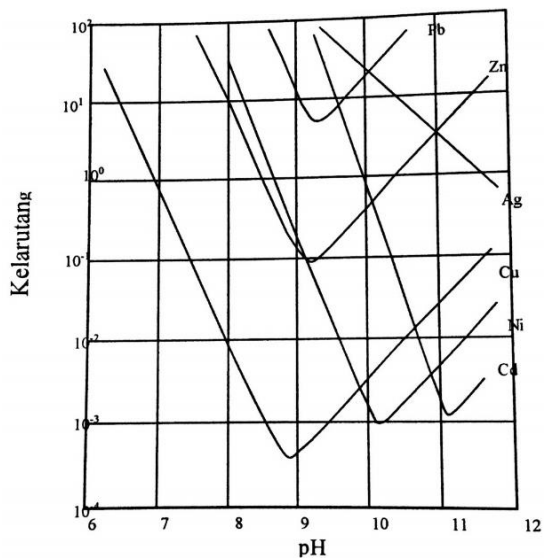
Riyanto (2013) menyatakan bahwa elektroda adalah konduktor yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dalam sel elektrolisis. Terdapat dua elektroda, yaitu elektroda inert dan elektroda tidak inert. Elektroda inert adalah elektroda yang tidak ikut bereaksi sebagai katoda maupun anoda, sehingga mengalami proses reduksi dan oksidasi. Elektroda memiliki kriteria cepat dan tidaknya tereduksi yang dapat dilihat pada deret volta berikut:

**Li-K-Ba-Sr-Ca-Na-Mg-Al-Mn-Zn-Cr-Fe-Cd-Co-Ni-Sn-Pb-
H⁺-Cu-Hg-Ag-Pt-Au**

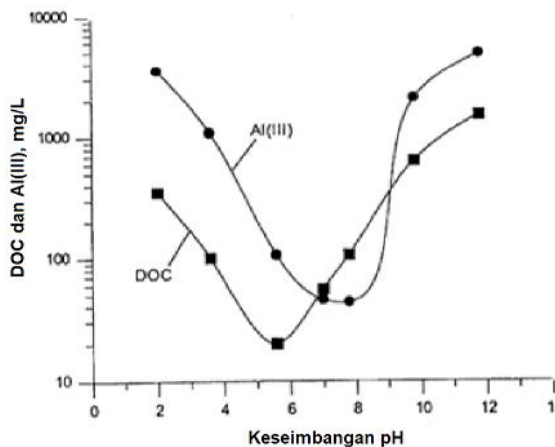
Pemilihan elektroda juga harus memperhatikan komposisi larutan elektrolit yang akan dielektrolisis. Elektroda haruslah yang tidak akan larut atau bereaksi dengan larutan elektrolit, oleh karena itu, digunakan kurva untuk menentukan kelarutan logam berat dengan fungsi pH yang dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.

- pH

Aluminium oksida adalah senyawa amfoterik, yang secara teoritis terdapat pada lumpur alum dapat direcover pada kondisi asam maupun basa. Konsentrasi *dissolved organic carbon (DOC)* yang terdapat pada lumpur alum akan meningkat pada kondisi basa. Konsentrasi tinggi DOC yang teroksidasi dapat memicu terbentuknya *trihalomethane*. pH optimal untuk kelarutan Al^{3+} adalah 4 (Sengupta, 2002). Kurva kelarutan Al^{3+} dan DOC dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 4 Kelarutan Logam Berat sebagai Fungsi pH
 Sumber : Trihadiningrum, 2016



Gambar 2. 5 Kelarutan Al^{3+} , DOC dan pH
 Sumber : Sengupta, 2002

- Kuat arus
Topayung (2011) menjelaskan bahwa untuk menentukan berat massa zat yang dihasilkan di elektroda dihitung menggunakan pendekatan kuat arus dengan Hukum Faraday I dan II.
- Hukum Faraday I: "Massa zat yang terjadi akibat reaksi kimia pada elektroda berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik yang mengalir pada larutan elektrolit selama elektrolisis".

$$m = \frac{e \times i \times t}{96500} \dots\dots\dots(2.4)$$

- Hukum Faraday II: "Massa berbagai zat yang terjadi selama elektrolisis, berbanding lurus dengan berat ekivalennya".

$$Q = i \times t \dots\dots\dots (2.5)$$

$$m = \frac{e \times Q}{96500} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

m = massa zat yang dihasilkan (gram)

e = berat ekuivalen

i = kuat arus (A)

t = waktu (s)

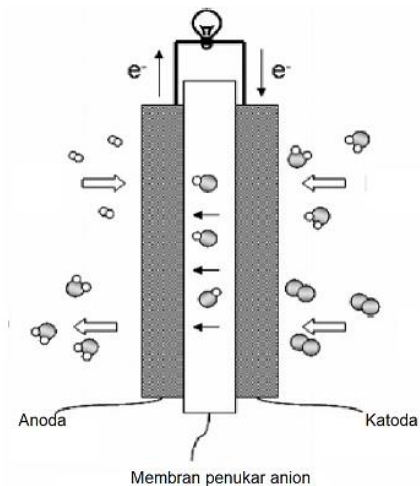
q = muatan listrik (Coloumb)

- Jarak elektroda
Menurut Yulianto *et al.* (2009), jarak antar plat elektroda sangat berpengaruh pada proses elektrolisis. Semakin dekat jarak antar elektroda maka efisiensi elektrolisis lebih besar. Jarak elektroda yang semakin jauh menyebabkan lintasan perputaran arus listrik semakin sedikit sehingga efisiensi proses yang terjadi semakin kecil.

2.5.3. Elektrolisis dengan Membran

Dalam penelitiannya, Varcoe *et al.* (2014) menemukan bahwa penggunaan membran pada proses elektrolisis dapat memaksimalkan ion yang tertangkap pada katoda. Ketika arus listrik dilewatkan ke dalam sistem, ion –

ion akan bergerak melewati AEM menuju anoda yang memiliki muatan berlawanan dengan ion negatif. Pada saat semua ion telah dipindahkan dari ruang antar membran tersebut. Menurut Merle *et al.* (2011), *anion exchange membrane* digunakan untuk memisahkan bagian antara katoda dan anoda. Membran AEM dapat berfungsi sebagai lapisan katalis dan perpindahan gas untuk mempercepat proses oksidasi, karena tidak terganggu kehadiran kation pada kompartemen anoda. Konfigurasi kombinasi elektrolisis dan *anion exchange membrane* dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2. 6 Kombinasi *Anion Exchange Membrane* dan Elektrolisis

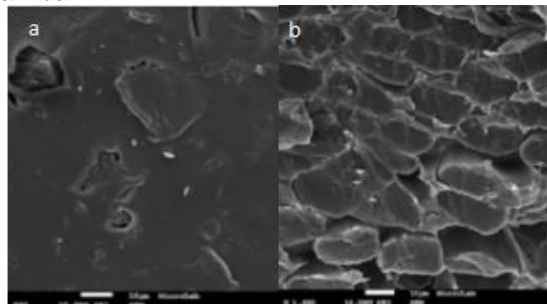
Sumber : Merle *et al.*, 2011

2.6. Karakteristik *Anion Exchange Membrane*

Salah satu jenis membran yang digunakan pada proses elektrolisis ini adalah *Anion Exchange Membrane (AEM)*. AEM memiliki hambatan listrik yang rendah, tidak larut dalam air, mudah dalam pengantiannya, tahan terhadap potensi penyumbatan, mudah dibersihkan, dan tahan terhadap fluktuasi pH. Membran AEM merupakan membran yang

melewatkan ion negatif (Valero *et al.*, 2011). AEM adalah membran polimer elektrolit yang melewatkan ion negatif. Peran AEM adalah mengalirkan kation serta membatasi pergerakan gas dan anion. Merle *et al.* (2011) menyebutkan bahwa penggunaan AEM pada proses elektrolisis dapat mengoptimalkan proses reduksi di katoda karena ion yang perlu direduksi sudah selektif.

Membran anion umumnya dibuat dari proses *crosslinking polymer* dengan menambahkan gugus fungsi untuk masing – masing membran. Membran penukar anion diberikan gugus fungsi positif. Afinitas membran penukar ion akan berbeda untuk setiap jenis ion yang bermuatan berbeda apabila membran penukar ion diletakkan dalam suatu larutan elektrolit. Anion atau ion bermuatan negatif akan bergerak menembus membran penukar anion karena adanya gugus fungsi positif di dalam membran. Kation dalam larutan elektrolit akan tertolak oleh membran penukar anion karena memiliki muatan yang sama dengan gugus fungsi positif (Sutrisna, 2002). *Anion exchange membrane* yang sering digunakan adalah tipe AMI-7001S. (Šljukić *et al.*, 2012) melakukan pengamatan untuk AMI-7001S dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dengan perbesaran 1000 kali. Hasil observasi SEM dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.

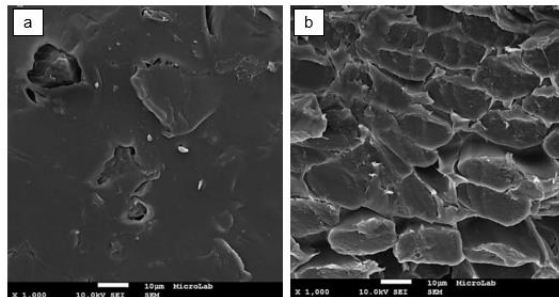


Gambar 2. 7 (a) Permukaan AMI-7001S (b) Penampang AMI-7001S

Sumber : (Šljukić *et al.*, 2012)

2.7. Karakteristik *Cation Exchange Membrane*

Cation Exchange Membrane (CEM) merupakan membran yang melewatkan ion positif. CEM memiliki hambatan listrik yang rendah, tidak larut dalam air, mudah dalam penggantianannya, tahan terhadap potensi penyumbatan, mudah dibersihkan, dan tahan terhadap fluktuasi pH. Membran ini selektif terhadap ion yang melaluinya, sehingga hanya ion-ion tertentu yang dapat lolos (Valero *et al.*, 2011). Membran yang digunakan lainnya adalah *Cation Exchange Membrane* (CEM). Membran penukar ion umumnya dibuat dari proses crosslinking polymer dengan menambahkan gugus fungsi untuk masing – masing membran. Membran penukar kation diberikan gugus fungsi negatif. Mekanisme kerja CEM adalah jika membran penukar ion diletakkan dalam suatu larutan elektrolit, afinitas membran penukar ion tersebut akan berbeda untuk setiap jenis ion bermuatan berbeda. Anion atau ion dengan muatan negatif dalam larutan elektrolit akan tertolak oleh membran penukar kation karena memiliki muatan yang sama dengan gugus fungsi negatif yang dimiliki oleh membran penukar kation. Skema kinetik pada daerah sekitar katoda adalah dengan adanya transfer dari permukaan membran kation dengan larutan elektrolit (Paunovic, 2007)



Gambar 2. 8 (a) Permukaan CMI-7001S (b) Penampang CMI-7001S

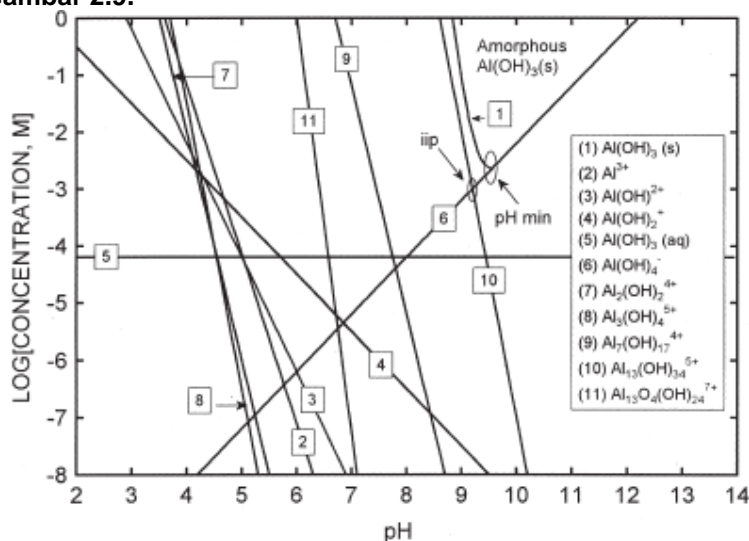
Sumber: (Šljukić et al., 2012)

2.8. Mobilisasi Ion Logam

Aluminium hidroksida adalah suatu senyawa kimia dengan rumus kimia $\text{Al}(\text{OH})_3$, ditemukan di alam.

Aluminium hidroksida bersifat amfoterik di alam, yaitu, senyawa ini memiliki sifat asam dan basa. Senyawa terkait yang berhubungan dengan senyawa ini seperti aluminium oksida hidroksida, $\text{AlO}(\text{OH})$, dan aluminium oksida atau alumina (Al_2O_3), yang terakhir juga bersifat amfoterik.

Senyawa ini bersama-sama merupakan komponen utama dari bijih bauksit aluminium. Aluminium sendiri merupakan ion kompleks dimana keberadaannya berbeda pada masing –masing pH. Menurut Bahena *et al.* (2002), aluminium dapat berikatan dengan ion hidroksil maupun ion hidrogen. Kelarutan aluminium kompleks dapat dilihat pada **Gambar 2.9.**



Gambar 2. 9 Kelarutan aluminium kompleks pada pH tertentu

Sumber: (Bahena *et al.*, 2002)

2.9. Perhitungan Efisiensi Proses

i. Hukum Faraday I

Hukum Faraday I menyatakan bahwa jumlah massa zat yang dihasilkan di elektroda berbanding lurus dengan jumlah listrik yang digunakan. Hal ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$m = \frac{e \times I \times t}{96.500} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

m : massa zat yang dihasilkan (gram)

e : berat ekivalen

i : kuat rus

t : waktu(s)

ii. Hukum Coulomb

Besarnya listrik yang mengalir yang dinyatakan dalam Coulomb merupakan arus listrik dikalikan dengan waktu operasi. Hubungan muatan listrik dengan kuat arus dinyatakan dalam rumus berikut :

$$Q = I \times t \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

i : kuat arus (A)

t : waktu (s)

Q : muatan listrik (coloumb)

iii. Konsumsi Energi Spesifik

Menurut Ilhan *et al.* (2008), kelayakan proses dalam aplikasi elektrokimia dapat dievaluasi dari efisiensi penurunan polutan dan dari aspek ekonomi kelayakan ditentukan oleh konsumsi energi spesifik. Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik.

$$Q = \frac{J \times A \times t}{v} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Sedangkan kerapatan arus (J) adalah kuat arus listrik yang mengalir di area elektroda.

$$J = \frac{I}{A} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

Oleh karena itu, muatan listrik spesifik dapat dicari melalui persamaan:

$$Q = \frac{I}{v} \dots\dots\dots(2.11)$$

Konsumsi energi spesifik (W) secara langsung berkaitan dengan muatan listrik spesifik (Q) dan tegangan listrik tertentu (V). Berikut ini merupakan persamaan konsumsi energi selama elektrolisis:

$$W = Q \times V \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- W = konsumsi energi spesifik (kWh/m³)
- Q = muatan listrik spesifik kAh/m³)
- I = kuat arus listrik (A)
- J = kerapatan arus (A/cm²)
- V = tegangan listrik (V)
- A = luas elektroda (m²)
- t = waktu operasi (s)
- V = volume elektrolit (L)

(Anglada *et al.*, 2009)

2.10. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan untuk penelitian ini terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

Penulis	Hasil	Efisiensi
Shi ,1992	Proses asidifikasi diperlukan untuk melarutkan logam-logam yang terdapat pada lumpur hasil koagulasi dan	Proses asidifikasi pada pH 4-5 dapat mengeluarkan aluminium pada lumpur alum sebanyak 70%.

Penulis	Hasil	Efisiensi
	flokulasi pada pengoalahan air.	
Dassanayake <i>et al.</i> , 2015	metode <i>dewatering</i> hingga bahan organik pada lumpur hilang.	<i>Recovery</i> aluminium dilakukan dengan pengeringan lumpur hingga 80%.
Irfan, 2007	Alum hasil <i>recovery</i> konvensional dapat dijadikan koagulan kembali dengan proses asidifikasi.	Hasil efisiensi asidifikasi yang didapat adalah sebesar 50%.
Yulianto <i>et al.</i> (2009)	Jarak elektroda 1,5 cm dan 3 cm berpengaruh besar terhadap efisiensi elektrolisis.	Jarak elektroda 3 cm menghasilkan efisiensi sebesar 30% sementara 1,5 cm menghasilkan efisiensi sebesar 88%.
Andriani, 2007	Elektroda perak dapat bekerja optimum pada beda potensial -1V sampai -6V	Efisiensi elektrolisis yang didapat adalah sebesar 70%.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Deskripsi Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme *recovery* aluminium lumpur PDAM menggunakan metode elektrolisis dengan membran penukar kation, anion dan tanpa membran. Penelitian dilakukan di PDAM Xk arena produksi air minum terbesar di Kota Surabaya, yaitu sebesar 2.500 L/detik. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan karakteristik lumpur PDAM serta menghitung kebutuhan energi spesifik proses. Penelitian utama didahului dengan penelitian pendahuluan yang dilakukan guna mendapatkan supernatan untuk elektrolisis serta menentukan arus listrik yang digunakan. Variasi dilakukan pada konfigurasi reaktor yang digunakan serta jarak elektroda. Pada akhir penelitian diharapkan dapat diperoleh kembali produk berupa aluminium.

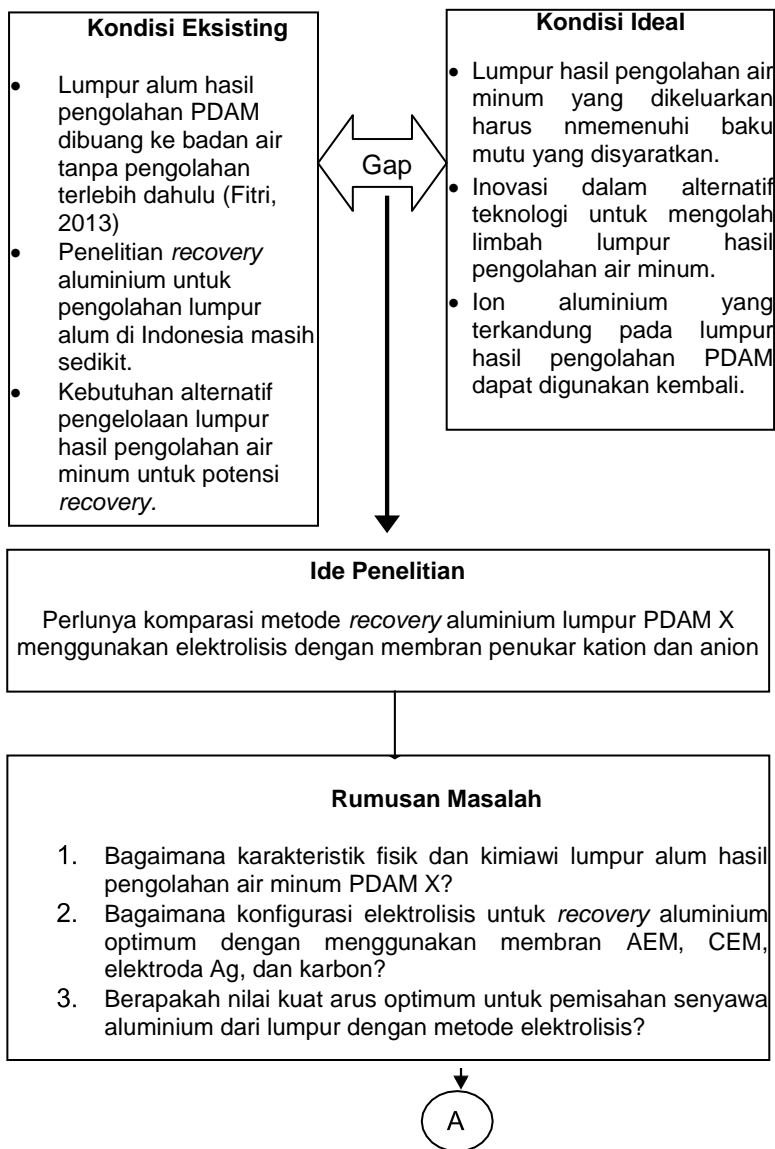
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

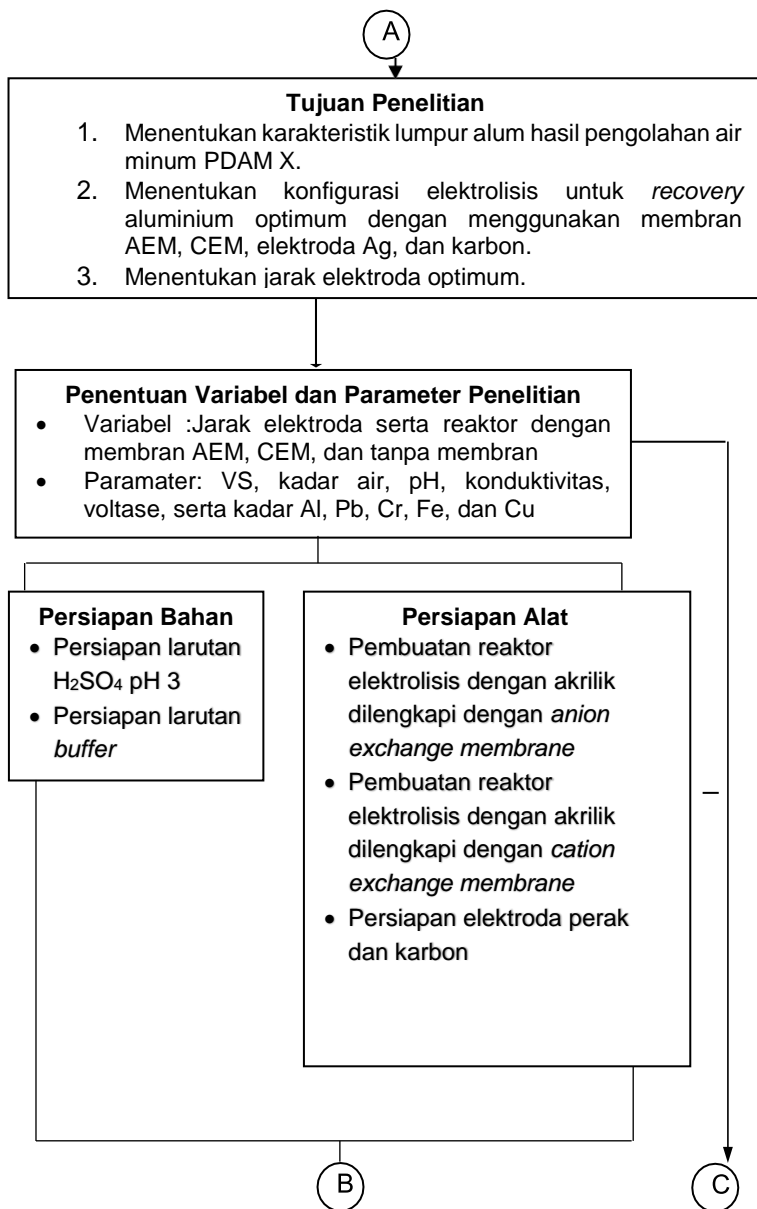
Lokasi pengambilan sampel di PDAM X. Pemilihan lokasi pengambilan sampel di PDAM X dikarenakan produksi air minum terbesar ada pada IPAM X yaitu sebesar 2.500L/dt (Rahman, 2017). Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS, Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil ITS dan Laboratorium Mikroorganisme Departemen Kimia ITS, sedangkan operasi reaktor dilakukan di Laboratorium Limbah Padat dan Bahan Berbahaya Beracun Departemen Teknik Lingkungan FTSLK-ITS. Penelitian dilakukan selama empat bulan dari bulan Februari sampai bulan Juni 2018.

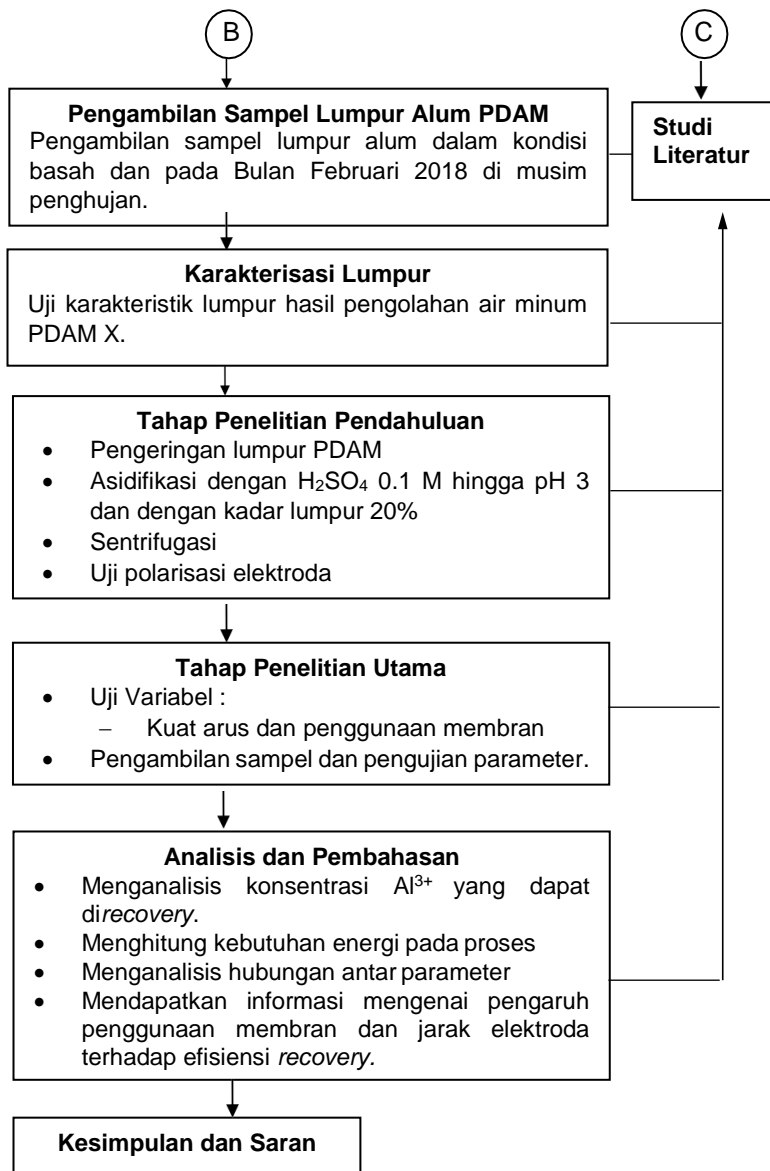
3.3. Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran alur pikir penelitian ini. Penyusunan langkah-langkah penelitian yang jelas dan sistematis bertujuan untuk mempermudah pelaksanaan penelitian. Kerangka penelitian diawali dengan perumusan ide penelitian sampai dengan penarikan kesimpulan. Secara garis besar penelitian yang akan dilakukan yaitu *recovery* ion aluminium

dari lumpur hasil pengolahan air minum dengan metode elektrolisis. Kerangka penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3.1**







Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.4. Penentuan Variabel dan Parameter

Metode penelitian kuantitatif yang sistematis memerlukan variasi penelitian untuk mendapatkan hubungan sebab akibat yang dapat dianalisis (Sarwono, 2006). Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah :

3.4.1 Jarak elektroda

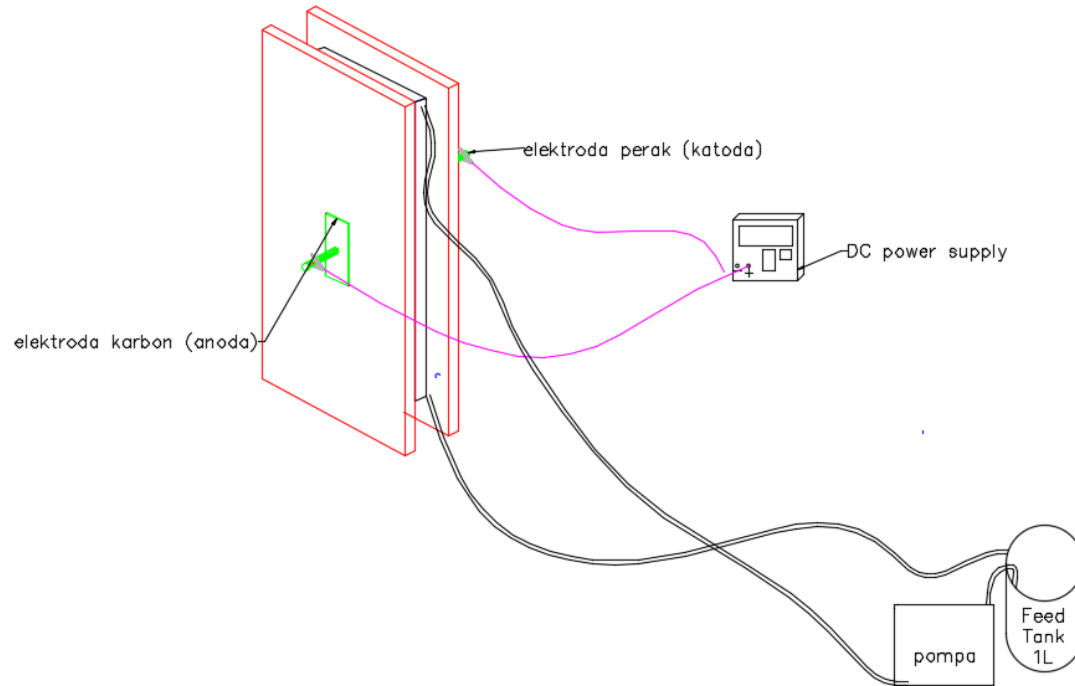
Jarak elektroda berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi elektrolisis. Pengaruh jarak elektroda menyebabkan adanya daya tembus (*throwing power*) sehingga hambatan dari larutan elektrolit berpengaruh. Jarak elektroda yang digunakan adalah 1 cm, 0,7 cm dan 0,2 cm (Amrulloh dan Palupi, 2014). Jarak elektroda berperan besar dalam efisiensi elektrokimia. Jarak elektroda maksimum yang dapat diaplikasikan pada proses elektrokimia adalah 1,5 cm (Aoudja *et al.*, 2010). Jarak antara elektroda berdampak pada kecepatan transfer elektron antara anoda yang menerima elektron dengan katoda sebagai tempat terjadinya proses reduksi. Terjadinya penurunan efisiensi pengolahan terjadi saat jarak antara elektroda semakin diperbesar yang menyebabkan adanya hambatan arus yang besar sehingga konduktivitas menurun (Alphanoda, 2016). Interaksi antara molekul - molekul menjadi lemah ketika jarak antara elektroda lebih dari 1 cm. Namun, jika jarak antara elektroda terlalu dekat akan menyebabkan jumlah koagulan meningkat sehingga sistem terganggu akibat hubungan singkat antar elektroda (Saputra dan Hanum, 2016).

3.4.2 Penggunaan Membran pada Reaktor

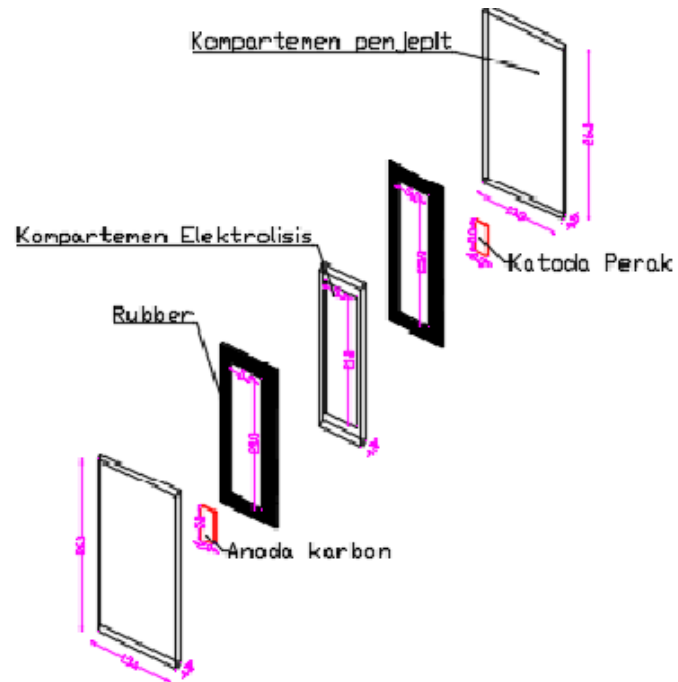
Variasi membran yang digunakan adalah *anion exchange membrane (AEM)*, *Cation Exchange Membrane (CEM)* serta tanpa penggunaan membran. Pada percobaan kali ini, variasi yang digunakan adalah sebagai berikut :

A. Tanpa membran

Reaktor dapat dilihat pada **Gambar 3.2**, sementara konfigurasi reaktornya dapat dilihat pada **Gambar 3.3**. Pada reaktor ini, larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan supernatan hasil proses asidifikasi yang kaya akan Al^{3+} .



Gambar 3. 2 Reaktor Tanpa Membran



Gambar 3. 3 Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran

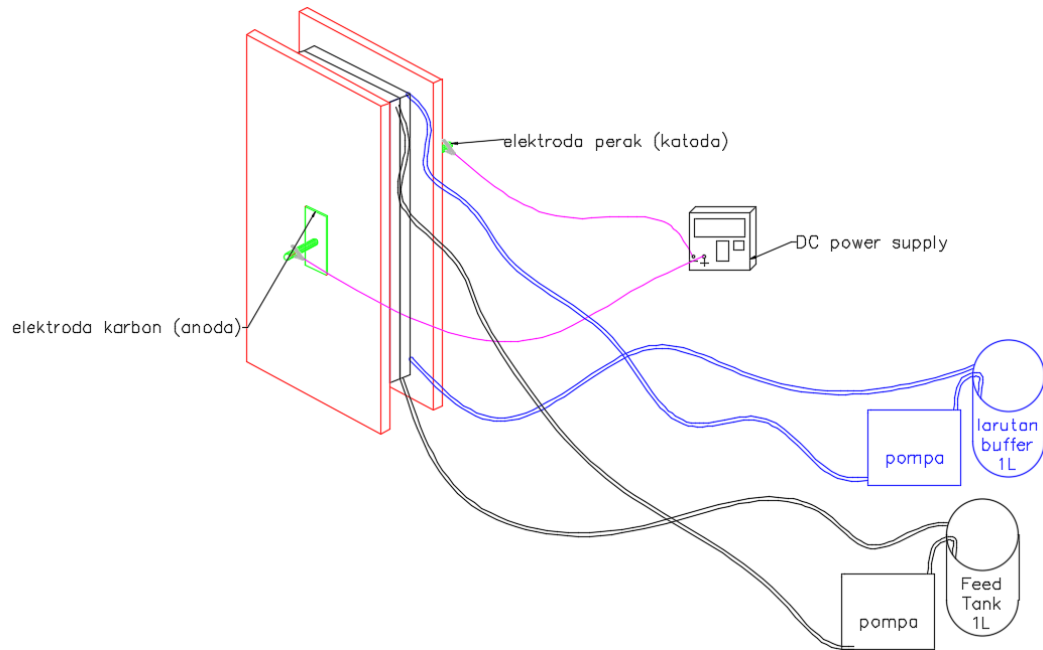
B. Cation Exchange Membrane

Penggunaan CEM untuk meningkatkan efisiensi proses elektrolisis. Mekanisme peningkatan efisiensi proses elektrokimia dengan membran CEM adalah dengan adanya perpindahan difusional ion H^+ . Kation berpindah melewati membran CEM dan memaksimalkan proses reduksi. Penggunaan membran CEM juga menyebabkan peningkatan resistivitas yang disebabkan karena adanya perbedaan potensial ion yang bergerak (Hwang dan Ohya, 1996). Reaktor dengan CEM dapat dilihat pada **Gambar 3.4**, sementara konfigurasi reaktornya dapat dilihat pada **Gambar 3.5**. Penggunaan CEM untuk memisahkan anion dari supernatan yang kaya akan Al^{3+} , sehingga proses reduksi yang ada di katoda dapat berjalan lebih optimal. Tipe CEM yang digunakan adalah CEM tipe CMI-7000S. Spesifikasi dapat dilihat pada **Tabel 3.1** (Varcoe *et al.*, 2014). Menurut APHA (2012), larutan elektrolit yang digunakan adalah 7 g *Potassium hydrogen tartate* ($KHC_4H_4O_6$) yang dilarutkan pada 1L aquades. Larutan elektrolit dihubungkan pada kompartemen katoda, sebagai media penghantar anion menuju katoda. Kompartemen anoda menggunakan supernatan hasil asidifikasi yang kaya akan Al^{3+} .

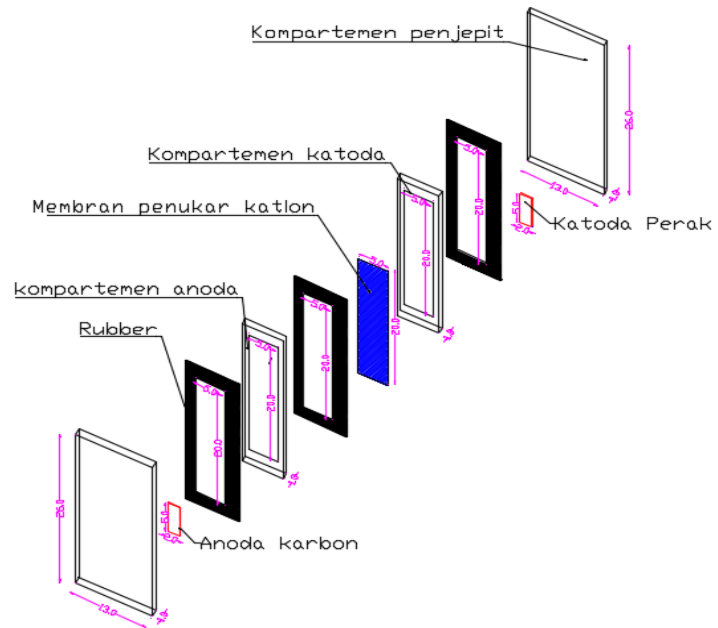
Tabel 3. 1 Spesifikasi Teknis Membran CEM

No	Spesifikasi Teknis	CMI-7000S
1	Struktur polimer	<i>Gel polystyrene cross linked with divinylbenzene</i>
2	<i>Functional group</i>	<i>Sulphonic acid</i>
3	Warna	Cokelat
4	Ketebalan (mm)	0,045±0,025
5	Luas hambatan (A/cm^2)	<30
6	Densitas arus maksimal (A/m^2)	<500
7	Kapasitas <i>exchange</i> (meq/g)	1,6±0,1

Sumber: International Membrane Inc.



Gambar 3. 4 Reaktor dengan Membran CEM



Gambar 3. 5 Konfigurasi Reaktor dengan Membran CEM

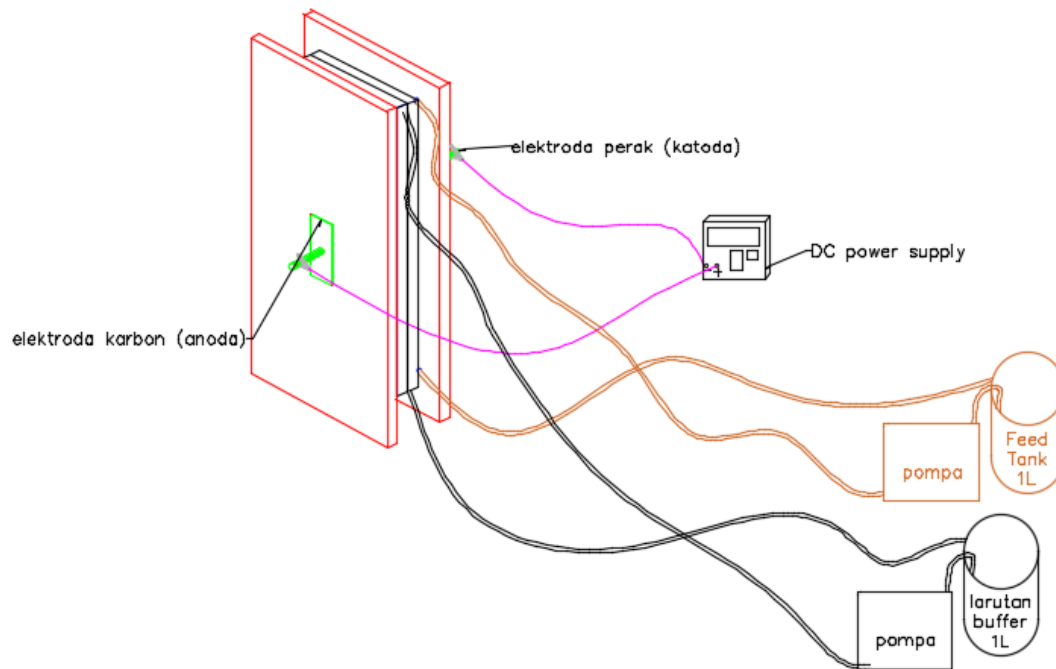
C. *Anion Exchange Membrane*

Reaktor dengan AEM dapat dilihat pada **Gambar 3.6**, sementara konfigurasi reaktornya dapat dilihat pada **Gambar 3.7**. Penggunaan *AEM* untuk memisahkan anion dari supernatan yang kaya akan Al^{3+} , sehingga proses reduksi yang ada di katoda dapat berjalan lebih optimal. Tipe AEM yang digunakan adalah AEM tipe AMI-7001S (Varcoe *et al.*, 2014). Proses elektrolisis untuk *recover* aluminium bekerja pada pH 3 untuk kelarutan Al^{3+} maksimal (Sengupta, 2002). Menurut APHA (2012), larutan elektrolit yang digunakan adalah 7 g *potasium hydrogen tartate* ($\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$) yang dilarutkan pada 1L aquades. Larutan elektrolit dihubungkan pada kompartemen anoda, sebagai media penghantar anion menuju anoda. Kompartemen katoda menggunakan supernatan hasil asidifikasi yang kaya akan Al^{3+} .

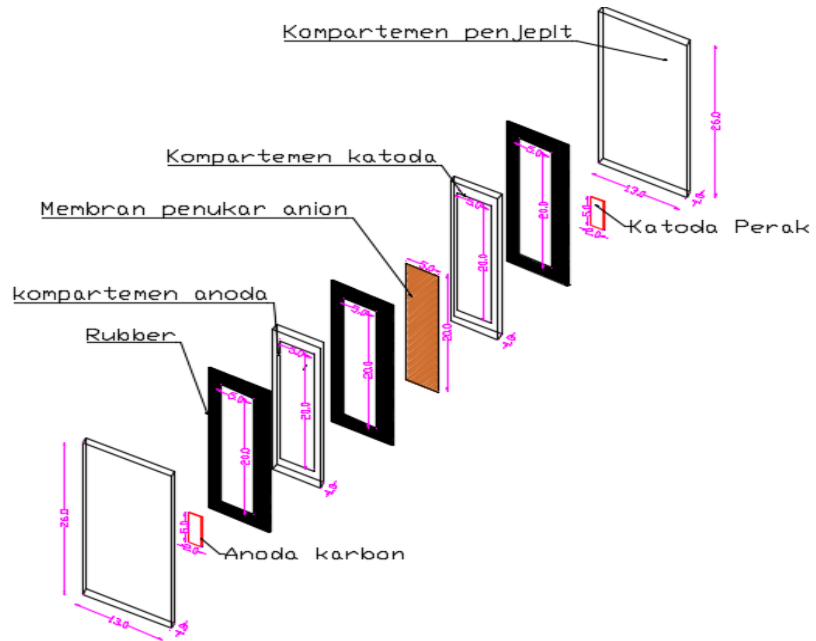
Tabel 3. 2 Spesifikasi Teknis Membran AEM

No	Spesifikasi Teknis	AMI-7001S
1	Struktur polimer	<i>Gel polystyrene cross linked with divinylbenzene</i>
2	<i>Functional group</i>	<i>Quaternary Ammonium</i>
3	Warna	Kuning terang
4	Ketebalan (mm)	0,045±0,025
5	Luas hambatan (A/cm^2)	<40
6	Densitas arus maksimal (A/m^2)	<500
7	Kapasitas <i>exchange</i> (meq/g)	1,3±0,1
8	Stabilitas temperatur maksimal ($^{\circ}\text{C}$)	90

Sumber: International Membrane Inc.



Gambar 3. 6 Reaktor dengan Membran AEM



Gambar 3. 7 Konfigurasi Reaktor dengan Membran AEM

3.5. Persiapan Alat dan Bahan

Penyiapan reaktor untuk proses elektrolisis dengan menggunakan membran CEM dan membran AEM. Tujuan digunakannya metode elektrolisis adalah untuk mendapatkan logam al murni. Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 3 Alat dan Kegunaan

No	Alat	Kegunaan
1	Reaktor Elektrolisis	Reaktor yang disiapkan yaitu dua reaktor dengan dimensi sebesar 20 cm x 5 cm x 1 cm. Satu reaktor tersebut terdiri atas 2 kompartemen. Operasional penelitian dilakukan secara sistem <i>batch</i> dengan resirkulasi Gambar reaktor ditampilkan pada Gambar 3.2. Adapun perhitungan kapasitas reaktor sebagai berikut: $V = 20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ $V = 100 \text{ cm}^3 = 0,1 \text{ L}$
2	Wire	Digunakan untuk menyalurkan arus listrik
3	Membran	Membran yang digunakan adalah <i>Anion Exchange Membran</i> (AEM/-) dengan tipe AMI 7001S dan <i>CEM</i> yang digunakan adalah tipe CMI 7000S
4	Elektroda	Elektroda yang digunakan adalah perak untuk katoda dan karbon pada anoda.
5	Pompa peristaltik	digunakan untuk mengalirkan air pada reaktor dengan debit 0,25 LPM.

No	Alat	Kegunaan
6	Kabel	digunakan untuk mengalirkan arus listrik
7	Selang berdiameter 3 mm	untuk pengaliran larutan elektrolit
8	DC <i>Adjustable Power Supply</i>	digunakan untuk sumber listrik
9	Botol Sampel	digunakan untuk menempatkan sampel
10	<i>Centrifuge</i>	digunakan untuk memisahkan larutan dari padatannya.
11	Kuvet	digunakan untuk menempatkan larutan tembus pandang yang akan diukur absorbansinya pada instrumen peralatan spektrofotometer
12	Corong kaca	digunakan untuk memasukkan larutan atau memindahkan larutan dari suatu tempat ketempat yang lain dan digunakan pula untuk proses penyaringan setelah diberi kertas saring pada bagian atas.
13	Pipet ukur	digunakan untuk memindahkan larutan atau cairan kedalam suatu wadah dengan berbagai ukuran volume.
14	Pipet tetes	digunakan untuk membantu memindahkan cairan dari wadah yang satu ke wadah yang lain dalam jumlah yang sangat kecil.

No	Alat	Kegunaan
15	Pipet volumetrik	digunakan untuk mengambil larutan dengan volume tertentu yang hanya memiliki satu ukuran volume.
16	Propipet	digunakan untuk membantu pipet menghisap/menyedot larutan.
17	Labu ukur	digunakan untuk pengenceran larutan sampai dengan volume tertentu dan bisa digunakan untuk menyiapkan larutan dalam kimia analitik yang konsentrasi dan jumlahnya diketahui dengan pasti
18	Gelas ukur	digunakan untuk mengukur volume larutan 10 mL hingga 25 mL
19	Spatula plastik dan logam	digunakan untuk mengambil bahan-bahan kimia dalam bentuk padatan.
20	<i>Magnestic stirer</i>	digunakan untuk pengadukan (menghomogenkan) larutan
21	pH meter	digunakan untuk mengukur derajat keasaman pada sampel
22	Neraca analitik	digunakan untuk mengukur berat kering kertas saring, berat lumpur kering dan lumpur basah
23	<i>Conductivity meter</i>	untuk menguji konduktivitas

No	Alat	Kegunaan
24	<i>Inductively Coupled Plasma (ICP)</i>	untuk uji kadar aluminium dan kandungan logam pengotor. Tipe yang digunakan adalah merk <i>Agilent Technologies series 700 ICP-OES</i>
25	<i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	Untuk menganalisis komposisi kimia dan konsentrasi sampel lumpur. XRF yang digunakan adalah merk <i>Thermo Scientific</i> tipe 9900 series.

Bahan yang digunakan antara lain:

- Lumpur alum basah dari IPAM PDAM Xsebagai limbah yang akan diolah.
- Potassium hydrogen tartate* ($\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$) sebagai larutan *buffer* dengan pH 3,0 (APHA, 2012) pada kompartemen anoda dan katoda.
- H_2SO_4 0,1 N dengan pH 3 untuk mengekstrak aluminium dari lumpur alum.
- Aquades digunakan sebagai pelarut dan blanko dalam analisis karakteristik lumpur PDAM.
- Larutan NaCl 5% digunakan untuk *pre-conditioning* membran.

3.6. Pengambilan Sampel Lumpur PDAM

Pengambilan sampel dilakukan pada unit clearator pada Bulan Februari 2018 di musim penghujan. Pengambilan lumpur dengan botol jerigen berbahan *polyethylene(PE)* (Hadi,2005). Pengambilan lumpur berdasarkan perhitungan :

- Kebutuhan lumpur sekali *running* : 200 g
- Running* yang dilakukan : 9 kali
- Total kebutuhan lumpur : $200 \text{ g} \times 9 = 1.800 \text{ g}$
- Kadar *solid* lumpur : 0,95 %
- Lumpur yang dibutuhkan : $\frac{1.800 \text{ g}}{0,95\%} = 163.636 \text{ g}$

Perhitungan volume lumpur yang dibutuhkan menggunakan data densitas lumpur alum. Perhitungan densitas lumpur adalah sebagai berikut :

- ρ : $\frac{\text{massa lumpur}}{10 \text{ mL}} = \frac{9,9 \text{ g}}{10 \text{ mL}}$
- ρ : 0,99 g/mL
- Volume lumpur : $\frac{\text{massa lumpur yang diperlukan}}{\rho}$
 : $\frac{163.636 \text{ g}}{0,99 \text{ g/mL}} = 165.289 \text{ mL} = 166 \text{ L}$

3.6 Karakterisasi Lumpur PDAM

Karakterisasi lumpur diperlukan untuk menentukan kandungan yang ada pada lumpur yang akan diuji. Karakteristik juga diperlukan untuk menentukan potensi *recovery* aluminium. Uji nilai parameter yang diukur adalah nilai VS, kadar air, pH, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, *Sludge Volume Index (SVI)*, konduktivitas, serta kadar Al, Pb, Cr, Fe, dan Cu dilakukan secara triplo. Analisis untuk parameter logam dilakukan dengan total konsentrasi. Metode uji parameter dapat dilihat pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3. 4 Parameter Penelitian

No	Parameter	Metode	Sumber
1	Nilai pH	Voltmetri	APHA AWWA, 2012
2	Kadar air	Gravimetri	APHA AWWA, 2012
3	Kadar <i>Volatile Solid (VS)</i>	Gravimetri	APHA AWWA, 2012
4	Kadar Al	Digesti	APHA AWWA, 2012
5	Kadar Pb, Cr, Fe dan Cu	Digesti	APHA AWWA, 2012

No	Parameter	Metode	Sumber
6	Alkalinitas	Titrimetri	APHA AWWA, 2012
7	Konduktivitas	<i>Conductivity</i> meter	APHA AWWA, 2012
8	<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	<i>Close reflux</i>	APHA AWWA, 2012
9	<i>Biological Oxygen Demand (BOD)</i>	Titrimetri-Winkler	APHA AWWA, 2012
10	<i>Sludge Volume Index (SVI)</i>	<i>Settling Test</i>	APHA AWWA, 2012

3.7 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk penyiapan proses elektrolisis, baik proses pembuata filtrat maupun kegiatan penyiapan elektroda dan variasi elektrolisis.

3.7.1 Persiapan Sampel Lumpur

Lumpur yang diambil berupa lumpur basah dan segar. Lumpur basah dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C selama 24 jam hingga kadar air hilang. Lumpur yang telah kering kemudian dihancurkan dengan mortar dan penumbuk dan dilakukan pengayakan pada ukuran 10 *mesh* (2mm) (Nair dan Ahammed, 2014). Proses pengeringan lumpur seperti yang disampaikan adalah dengan pengeringan sampel pada suhu 105°C selama 24 jam atau hingga berbentuk padat seperti tanah. Perhitungan kadar air dapat menggunakan persamaan 3.1.

$$\text{kadar air (\%)} = \frac{(X - Y)}{X} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana,

X = Berat lumpur sebelum dikeringkan (g)
 Y = Berat lumpur sesudah dikeringkan (g)
 Elicker *et al.* (2014)

3.7.2 Pelarutan dengan Asam

Sesuai dengan patent nomor US 6,495,047 B1 (2012), asidifikasi lumpur dilakukan dengan asam sulfat (H_2SO_4). Saat dilakukan ekstraksi dengan H_2SO_4 dengan pH 3, maka $\text{Al}(\text{OH})_3$ akan larut dan dihasilkan filtrat yang kaya akan $\text{Al}(\text{OH})_3$. H_2SO_4 adalah asam yang paling baik digunakan untuk proses elektrokimia karena mengurangi potensi terjadinya proton jumping (Choi *et al.*, 2001). Proses pelarutan lumpur kering dengan asam menggunakan asam sulfat 0,1 N dengan komposisi lumpur 200 gram dan H_2SO_4 sebanyak 20 ml. Komposisi lumpur dan asam sulfat merujuk pada kondisi lumpur sebesar 20% (Hovsepyan dan Bonzongo, 2009). Lumpur yang telah diasamkan berfungsi untuk mengekstrak aluminium yang ada pada lumpur kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam dengan kecepatan 300 rpm (Mirwan *et al.*, 2017).

3.7.3 Sentrifugasi

Dilakukan sentrifugasi dengan *centrifuge* kemudian diletakkan pada kertas saring.

3.7.4 Uji Polarisisasi

Tegangan minimum yang diperlukan untuk elektrolisis aluminium dapat diketahui dengan cara menghitung besar potensial reduksi standar, E_o (Volt). Nilai E_o (volt) yang digunakan disesuaikan dengan ion-ion yang ada pada larutan elektrolisi, yaitu sebagai berikut:

- | | |
|---|---------|
| (1.) $\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}(\text{s})$ | = -1,66 |
| (2.) $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$ | = -0,83 |
| (3.) $\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}(\text{s})$ | = -0,74 |
| (4.) $\text{Cd}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{s})$ | = -0,40 |
| (5.) $\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}(\text{s})$ | = -0,13 |
| (6.) $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}(\text{s})$ | = +0.80 |

Berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa tegangan minimal yang diperlukan agar semua kemungkinan reduksi-oksidasinya bisa terjadi yaitu 4,56 V ($E_o \text{ sel} = E_o (1) + E_o (2) + E_o (3) + E_o (4) + E_o (5) + E_o (6) = 1,66 + 0,83 + 0,74 + 0,40 + 0,13 + 0,80 = 4,56 \text{ V}$). Uji polarisasi dilakukan untuk mengetahui hubungan

voltase dan densitas arus pada variasi pasangan elektroda serta mengetahui *range* nilai kuat arus yang dapat digunakan. Pemilihan voltase uji disesuaikan dengan nilai potensial reduksi ion yang akan digunakan pada proses elektrolisis. Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian dengan pemasangan reaktor elektrolisis menggunakan larutan filtrat lumpur yang telah diasidifikasi dengan H_2SO_4 pH 3.00. Kondisi pada uji polarisasi perlu disesuaikan dengan kondisi pada saat proses elektrolisis. Penelitian dilakukan dengan meningkatkan nilai voltase pada setiap 0,2 Volt. Uji polarisasi dilakukan selama 3 menit untuk nilai voltase per titik. Kemudian dicatat kuat arus saat gelembung udara mulai terbentuk di anoda, karena keberhasilan proses reduksi dapat diukur dari terbentuknya gas di anoda. Arus listrik yang mengalir melalui elektroda pada masing-masing voltase tersebut dicatat. Data yang terkumpul kemudian diplot sebagai grafik/kurva polarisasi.

3.8 Penelitian Utama

Dalam penelitian utama, dilakukan pengamatan sesuai waktu operasi yang ditentukan 10 jam (Elicker *et al.*, 2014). Dua variabel yang digunakan yaitu variasi penggunaan membran dan variasi jarak elektroda menghasilkan sembilan variasi sampel yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, data diambil sebanyak tiga kali (*triplo*). Pada pengamatan ini, digunakan sistem *batch*. Volume supernatan yang digunakan pada satu siklus adalah 1 liter. Hal ini ditetapkan dengan mempertimbangkan rasio antara volume total supernatan yang diperlukan dan volume efektif reaktor. Variasi dan reaktor dijelaskan pada **Tabel 3.5** berikut:

Tabel 3. 5 Variabel Penelitian

Penggunaan membran pada reaktor / jarak elektroda	Reaktor penelitian utama		
	0,5 cm	1 cm	1,5 cm
	(A)	(B)	(C)
Tanpa membran (A)	AA	AB	AC

Dengan <i>Cation Exchange Membrane</i> (B)	BA	BB	BC
Dengan <i>Anion Exchange Membrane</i> (C)	CA	CB	CC

Sebelum melakukan penelitian utama, perlu dilakukan langkah pendahuluan. Langkah pertama yang harus dipersiapkan adalah *pre-conditioning* membran yang akan digunakan. Menurut International Membrane Inc., membran anion maupun kation direndam dalam larutan NaCl 5% selama 12 jam untuk membersihkan membran dari scaling maupun kotoran lain yang dapat mengganggu proses elektrolisis serta untuk membuka pori dari membran tersebut.

Proses elektrolisis diawali dengan pencucian elektroda dengan aquades untuk menghilangkan kontaminan pada elektroda. Elektroda yang telah dicuci perlu dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C selama 1 jam untuk menghilangkan kadar air, kemudian dilakukan penimbangan elektroda. Penelitian ini membutuhkan tiga konfigurasi reaktor yang berbeda. Satu reaktor menggunakan AEM, CEM, dan tidak menggunakan membran. Penggunaan membran ditujukan untuk memaksimalkan proses reduksi yang berjalan pada katoda. Reaksi berjalan dengan resirkulasi untuk memperbanyak kontak filtrat dengan elektroda (Varcoe et al., 2014).

Sampling dilakukan pada setiap pengamatan sebanyak sepuluh kali pada sepuluh titik waktu. Pada setiap kali pengambilan sampel dicatat pH, TDS, tegangan listrik, dan volume yang tersisa pada titik sampling untuk memudahkan perhitungan kesetimbangan massa (Verma *et al.*, 2013). Sementara untuk analisis COD, dilakukan *sampling* pada 10 waktu. Waktu dan kebutuhan sampel tertera pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3. 6 Kebutuhan Sampel

Parameter	Lokasi sampling	Kebutuhan (mL)	Waktu sampling
pH	AEM : kompartemen katoda	10 mL	t₀,t₁,t₂,t₃,t₄,t₅,t₆,t₇,t₈,t₉,t₉, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		
TDS	AEM : kompartemen katoda	10 mL	t₀,t₁,t₂,t₃,t₄,t₅,t₆,t₇,t₈,t₉,t₉, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		
Voltase	DC Supply	0 mL	t₀,t₁,t₂,t₃,t₄,t₅,t₆,t₇,t₈,t₉,t₉, t₁₀
COD	AEM : kompartemen katoda	10 mL	t₀,t₁,t₂,t₃,t₄,t₅,t₆,t₇,t₈,t₉,t₉, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran:		

Parameter	Lokasi sampling	Kebutuhan (mL)	Waktu sampling
	kompartemen berelektroda		
Kadar Al	AEM : kompartemen katoda	50 mL	t₀, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		
Kadar Fe	AEM : kompartemen katoda	50 mL	t₀, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		
Kadar Pb	AEM : kompartemen katoda	50 mL	t₀, t₁₀
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		

Parameter	Lokasi sampling	Kebutuhan (mL)	Waktu sampling
Kadar Cu	AEM : kompartemen katoda	50 mL	t_0, t_{10}
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		
Kadar Cr	AEM : kompartemen katoda	50 mL	t_0, t_{10}
	CEM :kompartemen anoda		
	Tanpa membran: kompartemen berelektroda		

Pada proses elektrolisis tanpa membran, air limbah dialirkan pada kompartemen berelektroda. Prinsip kerjanya adalah ion positif akan tereduksi di katoda dan oksidasi di anoda (Setiawan, 2013). Proses elektrolisis dengan CEM, air limbah akan dialirkan ke kompartemen anoda, sedangkan kompartemen katoda diisi oleh larutan *buffer*. Prinsip kerjanya adalah ion positif yang ada pada air limbah seperti Al^{3+} , Fe^{3+} akan tertarik ke bagian katoda melalui *Cation Exchange Membrane (CEM)* (Kumagai *et al.*, 1987). Sementara pada proses elektrolisis dengan AEM, air limbah dialirkan ke kompartemen katoda, sedangkan kompartemen anoda diisi oleh larutan *buffer*. Prinsip kerjanya adalah ion-ion negatif (anion) yang terkandung pada limbah seperti SO_4 akan tertarik ke bagian anoda melalui *Anion Exchange Membrane (AEM)* (Varcoe

et al., 2014). Setelah proses elektrolisis selesai selama 10 jam, dilakukan penimbangan pada elektroda yang sudah selesai digunakan dicuci dengan aquades untuk menghilangkan adanya kontaminan pada elektroda. Setelah itu, elektroda dikeringkan pada suhu 105°C untuk menghilangkan kadar air dan dilakukan penimbangan untuk perhitungan recovery Al. Elektroda yang telah ditimbang kemudian dicuci dengan larutan asam nitrat 0,1 N (HNO_3) hingga pH 3,00. Pencucian tersebut berfungsi untuk melarutkan seluruh padatan yang desposisi pada elektroda untuk kemudian dilakukan analisis logam. Reaktor yang telah digunakan dicuci dengan aquades pada setiap sisi reaktor. Reaktor yang telah bersih digunakan kembali untuk proses elektrolisis dengan variasi jarak elektroda yang lain.

Analisis logam dilakukan dengan menggunakan ICP Agilent Technologies series 700 ICP-OES untuk mengukur kadar Al, Pb, Cr, Cu, dan Fe pada *feed tank* saat jam ke-0, elektroda yang telah direndam HNO_3 , juga *feed tank* saat jam operasi ke-10. Penggunaan membran penukar ion pada proses elektrolisis berpotensi menyebabkan *scaling* (Hwang dan Ohya, 1996). *Scaling* pada membran penukar ion disebabkan oleh adanya pengendapan partikel, koloid, makromolekul, garam yang tertahan pada permukaan membran atau di dalam dinding pori membran serta yang menyebabkan penurunan fluks secara terus menerus. Adanya *scaling* dapat menyebabkan peningkatan hambatan listrik sehingga menurunkan efisiensi (Wenten *et al.*, 2013). Adanya *scaling* pada membran dapat diketahui dengan melakukan analisis dengan *Energy Dispersion X-ray spectroscopy (EDX)* apabila secara kasat mata ditemukan adanya *scaling*.

3.8 Analisis Data dan Pembahasan

Pada bagian hasil dan pembahasan akan ditulis secara deskriptif untuk menjelaskan penelitian akibat pengaruh parameter dan variabel yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam hasil penelitian meliputi beberapa hal berikut:

- Karakterisasi lumpur alum PDAM X dibandingkan dengan baku mutu.
- Menganalisis dan melakukan pembahasan terhadap kualitas effluen yang dihasilkan yaitu dari kadar logam Al, Pb, Cr, Cu, Fe. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.

- Menganalisis dan melakukan pembahasan terhadap proses elektrolisis dengan parameter TDS, pH, COD dan voltase. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.
- Menganalisis dan melakukan pembahasan pada pengaruh kuat arus terhadap efisiensi *recovery* dan nilai voltase pada proses elektrolisis dalam bentuk tabulasi dan kurva. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.
- Menganalisis dan melakukan pembahasan pada pengaruh penggunaan membran dalam optimasi proses elektrolisis dan dibandingkan dengan *recovery* aluminium yang didapat. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.
- Perhitungan *Kesetimbangan Massa*
Kesetimbangan Massa digunakan untuk mengetahui persebaran aluminium terbanyak yang dapat *direcover*.
- Perhitungan nilai *recovery* aluminium
Nilai Al^{3+} yang berhasil diperoleh dari berbagai variasi penggunaan membran dan kuat arus dibandingkan guna menentukan kondisi optimum proses *recovery*. Perhitungan nilai *recovery* Al^{3+} dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$\text{recovery (\%)} = \frac{(A - B)}{C} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana,

A = Berat elektroda setelah proses *recovery* (g)

B = Berat elektroda sebelum proses (g)

C = Berat Al pada lumpur sebelum diproses (g)

- Menghitung kebutuhan energi proses dan menentukan kebutuhan energi proses optimum dengan cara :

$$W = Q \cdot V \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan :

W = konsumsi energi spesifik (kWh/m³)

Q = muatan listrik spesifik (kAh/m³)

I = kuat arus listrik (A)

J = kerapatan arus (A/m²)

v = volume elektrolit (L) (Anglada *et al.*, 2009).

- Tegangan listrik dicatat setiap waktu pengambilan sampel. Energi spesifik proses dari setiap uji merupakan rata-rata konsumsi energi spesifik pada tiap pengambilan sampel. Penyajian data untuk sumbu Y menggunakan rata-rata massa tiap parameter dari kedua uji dengan deviasi yaitu COD dan massa aluminium. Massa diperoleh dari konsentrasi dikalikan volume yang tersisa di reaktor ketika pengambilan sampel sesuai waktu dilakukan. Penyajian data untuk sumbu X merupakan muatan listrik spesifik yang dinyatakan dengan rumus:

$$Q = \frac{I \times \Delta t}{V} \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan :

Q = muatan listrik spesifik (Ah L⁻¹)

I = kuat arus listrik(A)

t = waktu operasi (jam)

V = volume elektrolit(L) (Anglada *et al.*, 2009).

- Menghitung kebutuhan energi untuk oksidasi dan reduksi kemudian dibandingkan yang paling efektif dengan menggunakan pendekatan *Instantance Current Efficiency (ICE)* dengan rumus berikut :

$$ICE = n \times F \times V \times \frac{[g]_t - [g]_{t + \Delta t}}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan :

n = bilangan oksidasi O₂ atau Al³⁺

F = Bilangan Faraday 96.500

V = Tegangan Listrik proses

g = gram COD ataupun gram Al

I = kuat arus listrik

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Lumpur PDAM X

Karakterisasi lumpur PDAM diperlukan untuk mengetahui komposisi awal lumpur yang akan diproses serta untuk mengetahui potensi *recovery* aluminium pada lumpur. Pengambilan lumpur pada unit *clearator*. Pengurasan lumpur yang dilakukan pada unit *clearator* setiap hari. Hasil karakterisasi lumpur dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Karakterisasi Lumpur PDAM X

No	Parameter	Konsentrasi	Satuan
1	Kadar Air	99,08 ± 0,0056	%
2	<i>Sludge Volume Index</i>	114,18 ± 1,97	mL.g ⁻¹
3	<i>Volatiled Solids</i>	1.733 ± 4,05	mg.L ⁻¹
4	<i>Total Dissolved Solids</i> (TDS)	352,7 ± 1,54	mg.L ⁻¹
5	pH	7,46 ± 0,0047	-
6	Alkalinitas	70,8 ± 7,21	mg.L HCO ₃ ⁻¹
7	COD	9.666,6 ± 11,54	mg.L ⁻¹
8	BOD ₅	1.443,5 ± 17,33	mg.L ⁻¹
9	Logam Al	1,148519	mg.L ⁻¹
10	Logam Fe	0,504583	mg.L ⁻¹
11	Logam Cu	0,000537	mg.L ⁻¹
12	Logam Cr	0,000209	mg.L ⁻¹
13	Logam Pb	Tidak terdefinisi	mg.L ⁻¹

Karakterisasi lumpur dibagi menjadi karakteristik fisik dan kimiawi. Karakteristik fisik terdiri atas parameter TDS, SVI, kadar air. Sementara karakteristik kimiawi terdiri atas parameter pH, BOD, COD, alkalinitas, dan kandungan logam pada lumpur.

4.1.1. Karakteristik Fisik Lumpur

Karakteristik fisik lumpur perlu diperhatikan karena berhubungan dengan mekanisme penyiapan filtrat untuk dilakukan elektrolisis. Pengukuran *Total Dissolved Solids* (TDS) perlu dilakukan karena apabila nilai TDS lebih dari 550 mg.L⁻¹, pengukuran tidak bisa dilakukan dengan *conductivity meter* (APHA *et al.*, 2012). TDS yang terdapat dalam lumpur sebesar 352,7 mg.L⁻¹.

1. Sehingga pengukuran TDS dapat dilakukan dengan *conductivity meter*. Kadar air serta SVI pada lumpur berpengaruh banyak pada proses pengeringan lumpur alum. Nilai SVI pada lumpur alum PDAM diketahui 114,19 mL/g. Menurut Bye dan Oold (1998), kadar SVI menentukan kemampuan lumpur untuk melakukan pengendapan, pada rentang 100-200 mL.g⁻¹ menunjukkan bahwa lumpur susah mengendap.

4.1.2. Karakteristik Kimiawi Lumpur

Menurut penelitian Dayton dan Basta (2001) derajat keasaman pada lumpur hasil pengolahan air minum adalah 5.3 hingga 8.0. Nilai pH pada lumpur basah adalah 7,46. Sesuai dengan kelarutan Al dengan pH tertentu. Maka dibutuhkan sebuah mekanisme untuk mengekstrak aluminium hingga pH 3 (Sengupta, 2002). Pada karakterisasi lumpur alum ini juga dilakukan analisis alkalinitas. Alkalinitas adalah kemampuan air untuk mempertahankan pH air tersebut. Alkalinitas disebabkan oleh adanya ion hidroksida, karbonat, juga bikarbonat. Pada pH 8,3 atau pH dibawahnya. Alkalinitas disebabkan ion bikarbonat. Sehingga total alkalinitas didapat dari perhitungan alkalinitas bikarbonat (Sawyer *et al.*, 2003). Nilai alkalinitas pada lumpur sebesar 70,8 mg.LHCO₃⁻¹ menunjukkan bahwa terdapat kandungan bikarbonat pada lumpur yang berpengaruh pada proses asidifikasi. Adanya ion-ion bikarbonat juga berpotensi menyebabkan *scaling* pada membran penukar ion (Brewster *et al.*, 2016).

4.1.3. Kandungan Organik pada Lumpur

Karakterisasi kandungan organik pada lumpur PDAM dilakukan dengan pendekatan *Total Volatiled Solids (TVS)* dan diketahui besarnya nilai TVS adalah 1.733 mg.L⁻¹. Namun, menurut APHA *et al.* (2012), Pendekatan dengan TVS kurang efektif dikarenakan bikarbonat pada sampel ikut terbakar saat di *furnace*. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran dengan parameter lain untuk dapat mengukur kandungan organik pada lumpur. Pendekatan yang dilakukan untuk mengukur kandungan organik pada lumpur adalah dengan *Chemical Oxygen Demand (COD)* dan *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*. Pada pengukuran dengan COD, didapat hasil sebesar 9.666 mgO₂.L⁻¹ sementara untuk nilai BOD sebesar 1.443 mgO₂.L⁻¹. Menurut

Tchobanoglous *et al.* (2013), diperlukan perbandingan BOD/COD lebih dari 0,3 agar air limbah dapat diolah secara biologis. Sementara itu, pada lumpur alum PDAM, diketahui perbandingan $\frac{BOD}{COD} = 0,14$. Sehingga, lumpur hasil pengolahan PDAM X membutuhkan pengolahan lumpur secara kimiawi.

4.1.4. Kandungan Logam pada Lumpur

Kandungan logam pada lumpur dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Diketahui komposisi logam pada lumpur alum PDAM X dengan parameter Al, Fe, Cr, Cu masing-masing adalah 1,14; 0,50; 0,00053; 0,00029 mg.L⁻¹. Sementara untuk parameter logam Pb, tidak deteksi dikarenakan kandungan Pb sangat kecil dan tidak terbaca pada XRF. Menurut Dayton dan Basta (2001), kandungan logam yang tinggi pada lumpur alum didapatkan dari koagulan yang digunakan untuk mengurangi substansi organik yang terdapat pada air baku PDAM. Adanya bahan organik pada sampel lumpur alum dapat mengganggu dari proses *recovery* aluminium. Hal tersebut menunjukkan bahwa diperlukan mekanisme untuk mengekstrak logam yang ada pada lumpur.

4.2 Penelitian Pendahuluan

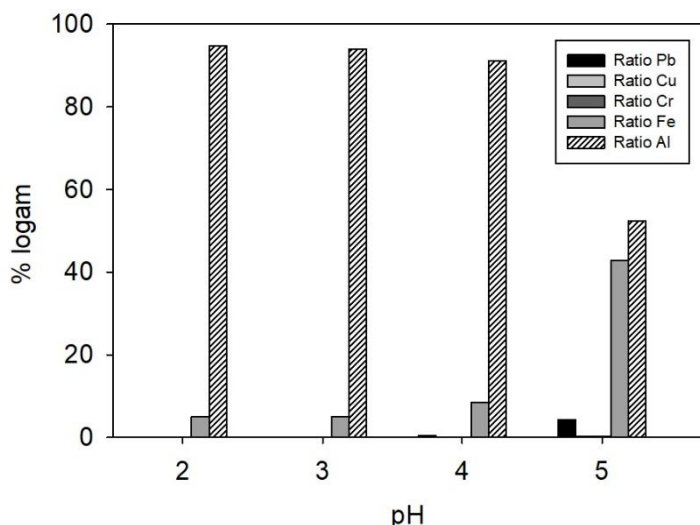
Penelitian pendahuluan dilakukan dengan tujuan untuk mempersiapkan larutan filtrat yang akan dilakukan elektrolisis dan arus listrik dari uji polarisasi yang digunakan pada penelitian utama.

4.2.1. Pengeringan Lumpur PDAM

Adanya panas saat dioven akan mengakibatkan ikatan kimia menjadi renggang dan pada temperatur tertentu atom-atom yang berikatan akan bergerak sangat bebas menyebabkan terputusnya ikatan kimia (Fitri, 2013). Hal tersebut diperlukan untuk membantu dalam proses asidifikasi lumpur. Pengeringan lumpur dilakukan selama 24 jam.

4.2.2. Proses Asidifikasi dan Sentrifugasi Sampel

Proses ekstraksi aluminium menurut Sengupta (2002) adalah dengan pH 2-5. Untuk menentukan pH optimum yang akan digunakan untuk proses elektrolisis, dilakukan asidifikasi pada pH 2, 3, 4, dan 5. Rasio hasil proses asidifikasi dan sentrifugasi pada rentang pH 2-5 dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4. 1 Rasio Kelarutan Logam-logam dalam pH

Perhitungan rasio kelarutan Al dan logam *impurities* didapat dengan membagi massa Al pada larutan dengan massa total kandungan logam. Rasio dapat dilihat pada **Gambar 4.1**, pada pH 2, rasio Al tertinggi yaitu sebesar 94,8% dengan konsentrasi 3.683 mg.L⁻¹ sementara untuk logam Fe, Pb, Cr dan Cu masing-masing sebesar 198,28; 2,1; 0,68; dan 1,37 mg.L⁻¹. Aluminium termasuk zat amfoter, sehingga keberadaannya pada pH tertentu dapat menjadi aluminium kompleks. Al³⁺ memiliki kelarutan yang tinggi pada pH 2-3, sedangkan untuk pH 4 kelarutan Al(OH)₃ memiliki kelarutan yang tinggi (Bahena *et al.*, 2002).

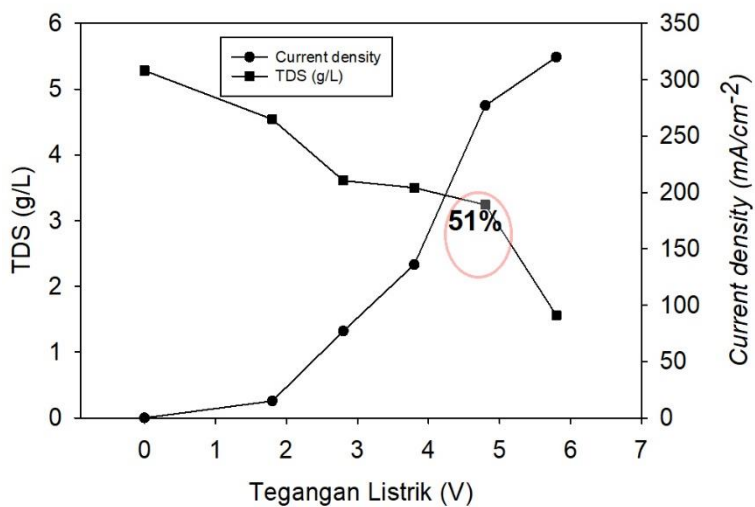
Sementara pada pH 3, 4, dan 5, diketahui kadar Al adalah sebesar 3092,2; 287,6; dan 9,4 mg.L⁻¹. Selain dapat mengekstrak aluminium, asidifikasi juga dapat mengekstrak logam-logam pengotor. Di antaranya adalah Pb, Fe, Cr, dan Cu (Sengupta, 2002). Pada **Gambar 4.1** diketahui komposisi logam selain aluminium yang terdapat dalam pH 3, 4, dan 5 adalah Fe masing-masing sebesar 196,65; 26,65 dan 7,714 mg.L⁻¹. Adapula untuk Pb, Cr, dan Cu pada pH 3, kadar Pb, Cr, Cu adalah 1,09; 0,092; 0,154 mg.L⁻¹. Untuk pH 4 didapat 1,25; 0,036; 0,156 mg.L⁻¹. Dan yang terakhir pada pH 5 didapat 0,758; 0,054; 0,032 mg.L⁻¹.

Hasil analisis kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, pada pH 2, kelarutan Al paling besar. Sengupta (2002) menyatakan bahwa untuk proses elektrokimia *recovery* aluminium optimum pada pH operasi 3-4 dikarenakan semakin mendekati pH netral maka perubahan kimia yang terjadi semakin cepat.

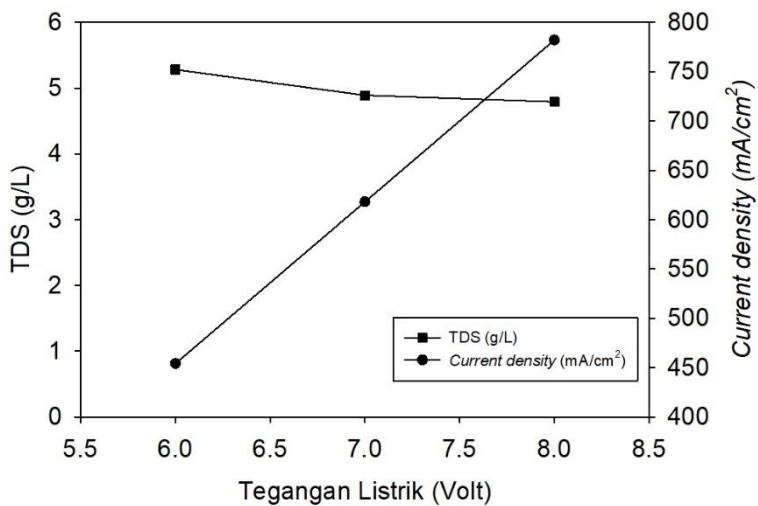
4.2.3. Uji Polarisasi Elektroda

Uji polarisasi elektroda dilakukan sebanyak dua kali untuk menentukan kisaran kuat arus yang dapat digunakan pada penelitian utama. Uji polarisasi menunjukkan kaitan anoda, katoda, larutan elektrolit serta kuat arus yang ada pada satu sistem (Yan, 2006). Uji polarisasi pertama. Diaplikasikan dua sistem dengan kisaran tegangan listrik 0 – 6 Volt dan 6- 9 Volt. Penentuan tegangan listrik didapat dari pendekatan tabel reduksi unsur (E^0). Peningkatan tegangan listrik setiap 3 menit, dan didapat hasil dari uji polarisasi dapat dilihat pada lampiran B Tabel 1.2 dan Tabel 1.3. Pengukuran TDS dilakukan pada 5 titik sekali. Hasil uji polarisasi dapat dilihat pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**. Dari **Gambar 4.2** dapat diketahui bahwa penyisihan TDS adalah sebesar 14%, 12%, 3%, 7% dan 51% berturut-turut pada tegangan listrik 1,8V, 2,8V, 3,8V, 4,8V, dan 5,8V. Sedangkan, penyisihan TDS untuk reaktor kedua masing- masing titik sebesar 1% pada tegangan listrik 6V, 7V, dan 8V.

Hal ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan penyisihan TDS lebih besar pada operasi reaktor dengan kisaran tegangan listrik 0V-6V. Pada reaktor kedua, terdapat sebuah anomali yaitu berubahnya *control voltage* menjadi *control current* disebabkan karena adanya *proton jumping*. *Proton jumping* menyebabkan elektron pada larutan elektrolit tidak stabil. Terjadi apabila perpindahan ion sudah *saturated* sehingga elektron bermuatan tidak dapat lagi menghantarkan arus listrik. Adanya *proton jumping* menyebabkan penurunan efisiensi sistem elektrokimia (Songa *et al.*, 2802). Adanya *proton jumping* dapat dibuktikan dengan adanya gelembung udara pada katoda pada kisaran kuat arus tersebut. Gelembung pada katoda disebabkan oleh adanya reduksi H_2O menjadi H_2 (Setiawan , 2013).



Gambar 4. 2 Uji Polarisasi pada 0-6 Volt



Gambar 4. 3 Uji Polarisasi pada 6-9 Volt

Hasil dari uji polarisasi menunjukkan bahwa pada kisaran tegangan listrik 0-6 V, penyisihan TDS dapat terjadi. Penyisihan TDS disebabkan berkurangnya ion-ion penghantar listrik dikarenakan adanya proses reduksi oksidasi (Ghangrekar dan Shinde, 2007). Hasil uji polarisasi dengan kisaran tegangan listrik 0-6 Volt memiliki potensi untuk digunakan sebagai acuan kuat arus yang digunakan.

Pada **Gambar 4.2**, diketahui penyisihan nilai TDS terbesar 51% pada kuat arus 300mA. Penyisihan TDS sebesar 51% menandakan bahwa ion-ion yang terlarut sudah tereduksi pada katoda sehingga ion terlarut berkurang pada kompartemen. Pada pencatatan arus listrik di setiap pengambilan titik sampel diperoleh hasil yang stabil. Kemudian, pada arus listrik di atas 300 mA, menjadi tidak konstan dikarenakan hambatan yang berkurang akibat proses reduksi yang terjadi. Maka, dari efisiensi penyisihan TDS dan dengan mempertimbangkan kestabilan arus listrik maka ditetapkan untuk penelitian utama kuat arus listrik ditetapkan 0,3 A dengan masa operasi 10 jam (Elicker *et al.*, 2014).

4.3 Penelitian Utama

Pelaksanaan penelitian utama bertujuan untuk mengetahui efisiensi *recovery* aluminium dari lumpur PDAM. Selain itu penelitian juga bertujuan untuk menentukan kebutuhan energi dari kombinasi proses. Variasi yang digunakan adalah variasi penggunaan membran yaitu dengan CEM, AEM, maupun tanpa membran. Variasi yang kedua adalah jarak elektroda yaitu sebesar 1 cm, 0,7 cm serta 0,2 cm.

Tujuan dari variasi yang diterapkan adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan membran serta jarak elektroda dalam peningkatan efisiensi *recovery* aluminium. Penggunaan membran berfungsi untuk melakukan seleksi ion yang akan melakukan oksidasi maupun reduksi pada elektroda. Ion-ion positif atau yang disebut kation akan melewati membran penukar kation untuk selanjutnya melakukan reduksi di katoda. Sementara untuk mekanisme penggunaan AEM, ion-ion negatif atau yang disebut anion akan berpindah menuju anoda (Christensen *et al.*, 2005).

Jarak antara elektroda berdampak pada kecepatan transfer elektron antara anoda yang menerima elektron dengan katoda sebagai tempat terjadinya proses reduksi. Jika jarak antara elektroda terlalu dekat akan menyebabkan sistem mengalami

gangguan akibat hubungan singkat antar elektroda. Tetapi penurunan efisiensi pengolahan terjadi saat jarak antara elektroda semakin diperbesar karena adanya hambatan arus yang besar sehingga konduktivitas menurun (Saputra dan Hanum, 2016). Maka dibuat tiga variasi nilai jarak elektroda yang sesuai dengan pertimbangan ukuran reaktor yaitu 1 cm, 0,7 cm, dan 0,2 cm. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak elektroda dalam peningkatan efisiensi *recovery* aluminium. Penyajian data seluruh parameter uji merupakan rata-rata dari hasil analisis tiga kali pengujian dengan standar deviasi.

4.3.1. Hasil Proses Elektrolisis

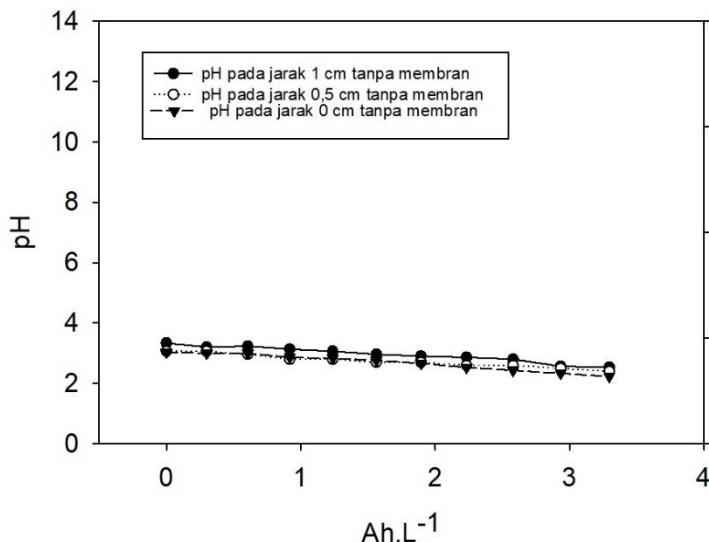
Pada proses elektrolisis terjadi perpindahan kation dan anion dengan mekanisme oksidasi reduksi. Pada variasi penelitian, penggunaan membran maupun jarak elektroda diuji untuk meningkatkan efisiensi proses elektrolisis itu sendiri.

Dalam hal ini terjadi perpindahan kation Al^{3+} dan Fe^{2+} dari kompartemen yang berisi limbah melalui membran kation menuju elektroda yang dialiri muatan listrik negatif (katoda) perak dan tertangkap di kompartemen berisi *aquadest*. *Buffer* digunakan sebagai penangkap ion-ion baik anion maupun kation. Perpindahan anion seperti SO_4^{2-} terjadi melalui membran anion menuju elektroda yang bermuatan positif (anoda) karbon. Akibatnya, konsentrasi TDS pada air limbah akan berkurang sedangkan pada buffer untuk variasi CEM dan AEM akan semakin tinggi karena menerima perpindahan ionnya seiring bertambahnya durasi operasi reaktor.

4.3.2. Tanpa Membran

Dalam variabel tanpa membran, digunakan variasi jarak antar elektroda. Jarak elektroda yang digunakan adalah 0,2 cm, 0,7 cm dan 1 cm. Fluktuasi nilai pH pada konfigurasi tanpa membran dengan variasi jarak dapat dilihat pada **Gambar 4.4**. Data

pengamatan pH dan TDS pada konfigurasi tanpa membran dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 2.1 – Lampiran B Tabel 2.3.

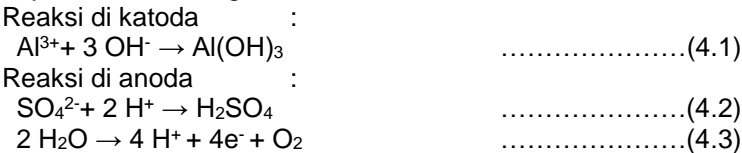


Gambar 4. 4 Fluktuasi nilai pH pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran

Pada **Gambar 4.4**, terjadi penurunan pH untuk semua variasi jarak. Pada jarak elektroda 1 cm, nilai pH setiap jam masing masing sebesar 3,33 menjadi 3,20 pada dua jam pertama, dilanjutkan 3,23; 3,13; 3,07; 2,97; 2,90; 2,87; 2,80. Pada jam ketiga hingga jam kedelapan, kemudian 2,57 dan 2,53 pada jam kesembilan dan kesepuluh. Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm juga terdapat penurunan nilai pH masing masing dari 3,07 menjadi 2,97 dan 2,80 pada jam ketiga dan kelima operasi elektrolisis, kemudian 2,70 hingga jam keenam, dan 2,6 hingga jam ke delapan. Nilai pH pada jam kesembilan dan kesepuluh masing- masing sebesar 2,5 dan 2,40. Pada variasi jarak elektroda sebesar 0,2 cm, terdapat nilai pH sebesar 3,03 kemudian menjadi 3,00 pada dua jam pertama operasi. Penurunan nilai pH pada jam kedua hingga kesembilan masing-masing adalah sebesar 2,87; 2,83; 2,77; 2,67; 2,53; 2,43 dan 2,33. Di akhir proses elektrolisis

terjadi penurunan pH sebesar 2,23. Nilai pH terkecil terjadi pada jarak elektroda 0,2 cm sebesar 2,23

Menurut Chen *et al.* (2000), pH memegang peranan penting dalam proses elektrokimia. Reaksi kimia yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut :

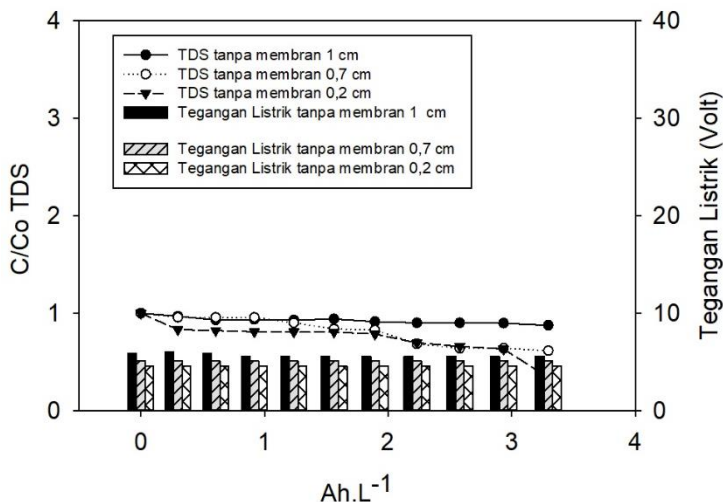


Produksi ion H⁺ hasil oksidasi dari H₂O dipengaruhi oleh nilai potensial reduksi dan oksidasi dari H₂O itu sendiri. Variasi jarak elektroda menyebabkan semakin dekat jarak elektroda, tegangan listrik akan semakin besar sehingga produksi H⁺ hasil oksidasi H₂O akan semakin banyak.

Menurunnya pH pada proses elektrolisis dapat juga mengindikasikan bahwa energi yang diberikan pada proses elektrolisis lebih banyak digunakan untuk proses oksidasi (Polcaro *et al.*, 2010) . Selain dapat merecovery aluminium, mekanisme asidifikasi dengan pH yang rendah juga dapat mengoksidasi kandungan bahan organik yang ada pada air limbah (Sengupta, 2002).

Parameter lain yang digunakan untuk mengukur keberhasilan proses adalah TDS. TDS pada air limbah yaitu filtrat dari lumpur menunjukkan adanya ion-ion, salah satunya adalah ion logam yang terdapat dalam air limbah. Pengukuran TDS tidak membedakan ion (Scanell dan Duffy, 2007). Sehingga, diperlukan analisis logam untuk menentukan keberhasilan proses elektrolisis.

Logam-logam yang kemungkinan besar akan tereduksi pada katoda adalah Al dan Fe. Analisis kadar logam Al, Fe, Pb, Cr, dan Cu dilakukan untuk menentukan *recovery* aluminium pada limbah. Fluktuasi TDS dan tegangan listrik pada konfigurasi tanpa membran dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4. 5 Fluktuasi nilai TDS dan Tegangan Listrik pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran

Pada **Gambar 4.5** diketahui bahwa pada ketiga variasi menghasilkan penurunan TDS pada filtrat. Pada variasi jarak elektroda 1 cm terdapat penurunan sebesar 3% pada jam pertama kemudian 7% hingga jam kelima kemudian dilanjutkan 9% pada jam keenam dan penurunan sebanyak 10% hingga akhir proses elektrolisis. Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm terjadi penurunan nilai TDS sebanyak 4% hingga jam ketiga dilanjutkan penurunan sebesar 10%, 16%, 17%, 32%, 36%, 36% dan 39% dari jam keempat hingga akhir proses elektrolisis.

Pada variasi jarak elektroda sebesar 0,2 cm terjadi penurunan nilai TDS sebesar 17% pada jam pertama proses elektrolisis. Dilanjutkan penurunan sebesar 19% selama 5 jam operasi elektrolisis, kemudian nilai TDS berkurang sebanyak 21% di jam keenam dan sebanyak 30%, 34%, 37%, dan 66% pada jam ketujuh hingga akhir proses elektrolisis.

Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin dekat jarak antar elektroda maka tegangan listrik yang diperlukan akan semakin kecil sehingga penyisihan TDS akan semakin besar karena ion-ion telah tereduksi dan teroksidasi lebih cepat (Nurajijah *et al.*, 2014). Hal tersebut dikarenakan semakin jauh jarak anoda dan katoda

menyebabkan membuat semakin lambat pergerakan ion (Alphanoda, 2016).

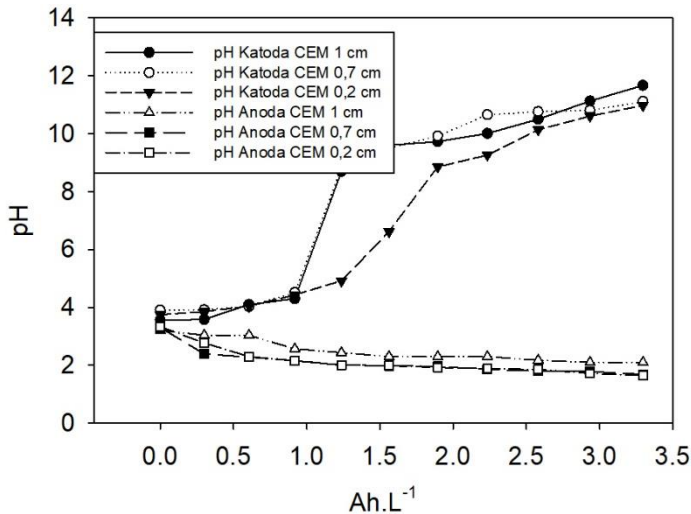
Parameter lain yang diperhatikan pada penelitian ini adalah fluktuasi besaran tegangan listrik. Tegangan listrik merupakan parameter penting untuk diperhatikan karena kelayakan proses elektrokimia/elektrolisis tidak hanya ditentukan dari efektifitas penurunan konsentrasi polutan, tapi juga dari efisiensi pengolahan berdasarkan konsumsi energi spesifik (Anglada *et al.*, 2009).

Pada **Gambar 4.5**, diketahui dengan variasi jarak 1 cm, tegangan listrik yang diperlukan lebih besar dari variasi dengan jarak 0,7 cm maupun 0,2 cm. Hal tersebut dikarenakan jarak elektroda menyebabkan perbedaan konduktansi elektrolit. Semakin besar jarak elektroda, maka konduktansi elektrolit semakin kecil sehingga hambatan besar dan tegangan listrik meningkat (Alphanoda, 2016). Sementara itu, tegangan listrik yang diperlukan juga cenderung konstan pada masing-masing jarak. Hal tersebut dikarenakan adanya reaksi oksidasi di anoda menyebabkan adanya kompetisi reaksi oksidasi dan pembentukan oksigen di anoda serta reaksi reduksi di katoda. Efisiensi reduksi dan oksidasi pada elektrolisis dipengaruhi jumlah arus yang terkonversi berdasarkan hukum Faraday. Pada kenyataannya, tidak semua arus listrik dapat terkonversi untuk melakukan reduksi ion aluminium di katoda (Suseno, 1997).

Perbedaan nilai tegangan listrik pada masing-masing variasi jarak disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan transfer elektron antara anoda yang menerima elektron dengan katoda sebagai tempat terjadinya proses reduksi dan melepas elektron. Jika jarak antara elektroda terlalu dekat akan menyebabkan sistem mengalami gangguan akibat hubungan singkat antar elektroda (Saputra, 2016).

4.3.3. Cation Exchange Membrane

Pada *Cation Exchange Membrane (CEM)*, digunakan variasi jarak antar elektroda. Jarak elektroda yang digunakan adalah 0,2 cm, 0,7 cm dan 1 cm. Penggunaan konfigurasi elektrolisis dengan membran CEM. Hasil dari perubahan pH pada kompartemen katoda dan anoda dengan variasi jarak dapat dilihat pada **Gambar 4.6**. Data pengamatan pada konfigurasi membran CEM dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 2.4 – Tabel 2.9.



Gambar 4. 6 Fluktuasi nilai pH pada Konfigurasi Reaktor Tanpa Membran

Fluktuasi nilai pH yang terdapat pada **Gambar 4.6** menunjukkan terjadinya kenaikan pH pada kompartemen katoda sementara pada kompartemen anoda mengalami penurunan pH. Hal tersebut dikarenakan terdapat proses reduksi pada kompartemen katoda dan oksidasi di kompartemen anoda.

Pada jarak elektroda 1 cm, pada katoda terdapat kenaikan pH dari 3,55 menjadi 3,57; 4,10; 4,32; 8,70; 9,60; 9,73; 10,01; 10,50; 11,13 dan 11,67 pada jam operasi kedua hingga kesepuluh. Kompartemen anoda yang berisi filtrat aluminium melakukan oksidasi sehingga cenderung mengalami penurunan pH yang awalnya 3,2 kemudian menjadi 3,03 di jam pertama dan kedua, kemudian menurun 2,57 dan 2,43 pada jam ketiga dan keempat. Pada jam kelima hingga ketujuh menjadi 2,30 dan pada jam kedelapan turun lagi menjadi 2,17. Dan di akhir operasi pH anoda menunjukkan angka 2,10. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya mekanisme perpindahan ion H^+ serta ion OH^- dalam sistem elektrolisis pada membran.

Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm juga terdapat kenaikan pH pada kompartemen katoda dari 3,91 menjadi 4,03 di jam kedua operasi. Kemudian berangsur-angsur naik mulai 4,51;

8,83; 9,50; 9,92; 10,66; 10,76; 10,81 dan 11,11 pada jam ketiga hingga akhir operasi. Kenaikan pH yang besar pada jam ketiga dan keempat disebabkan oleh penggunaan CEM yang dapat meningkatkan pH akibat adanya transport proton dan ion hidroksil (Rozendal *et al.*, 2008). Selain itu, pada kompartemen anoda terdapat penurunan pH dari mulanya sebesar 3,30 menjadi 2,39; 2,28; 2,15; 2,01; 1,98; 1,96; 1,85; 1,80; 1,78; dan 1,68 pada jam kedua hingga akhir operasi.

Penelitian pada jarak elektroda 0,2 cm juga menunjukkan adanya kenaikan nilai pH pada kompartemen katoda dari awalnya 3,74 kemudian menjadi 3,85; 4,04; 4,43; 4,91; 6,62; 8,86; 9,27; 10,14 pada jam kedua hingga kedelapan. Pada jam kesembilan dan kesepuluh menjadi 10,61 dan 10,98. Terdapat perbedaan pada kenaikan pH antar variasi. Pada jarak elektroda 0,7 cm kenaikan pH pada jam operasi kelima, pada jarak elektroda 0,2 cm kenaikan pH yang besar dimulai pada jam keenam dikarenakan transport proton ataupun ion hidroksil dipengaruhi oleh tegangan listrik yang diberikan (Rozendal *et al.*, 2008). Pada kompartemen anoda terdapat penurunan pH yaitu dari awal nya 3,33 menjadi 2,76; 2,30; 2,15; 2,00; 1,98; 1,92; 1,87; 1,85; 1,71 pada jam pertama hingga jam kesembilan. Dan di akhir jam operasi menjadi 1,61.

Penurunan pH pada kompartemen anoda menunjukkan bahwa adanya mekanisme pada kompartemen anoda dimana dapat menghasilkan ion-ion H^+ . Penggunaan membran CEM untuk elektrolisis menyebabkan reduksi kation yang menghasilkan gas hidrogen (Rozendal *et al.*, 2007). Variasi jarak antar elektroda menyebabkan perbedaan resistensi pada proses elektrolisis. Hal ini yang menyebabkan pH pada masing-masing variasi berbeda. Resistensi berkaitan erat dengan tegangan listrik. Dimana tegangan listrik dalam penelitian ini merupakan energi yang diperlukan untuk melakukan reduksi maupun oksidasi.

Pada penggunaan CEM, tidak ada presipitat yang terbentuk pada katoda. Reaksi yang mungkin terjadi pada konfigurasi CEM adalah sebagai berikut:

Reaksi di katoda :



Reaksi di anoda :



(Chen *et al.*, 2000)

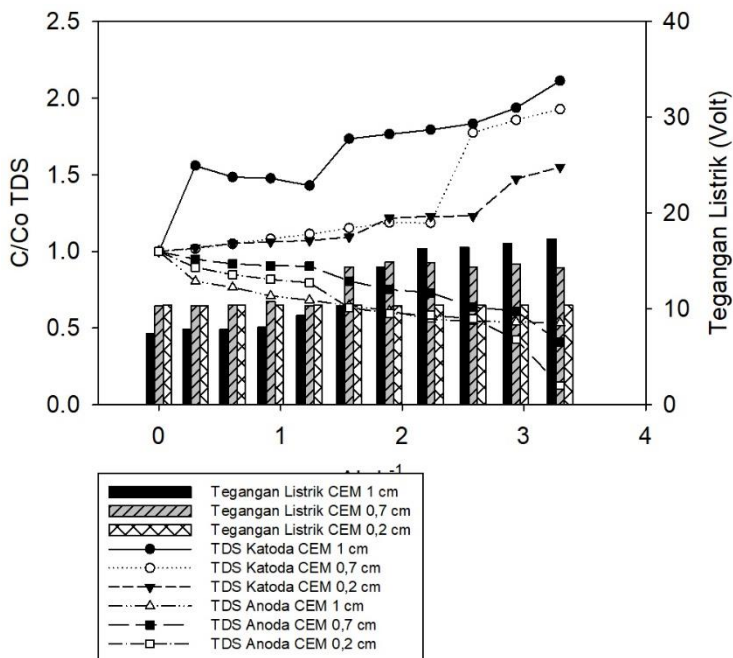
Menurut Chen *et al.* (2000), $\text{Al}(\text{OH})_3$ adalah amfoter sehingga dapat bersifat asam maupun basa. Hidrolisis aluminium menyebabkan adanya pemecahan ion aluminium ketika bereaksi dengan H_2O sehingga dapat menjadi $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ pada pH yang tinggi. Reaksi (4.4) menyebabkan kenaikan pH. Kenaikan pH menyebabkan reaksi (4.5) terjadi. $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ tidak dapat menjadi presipitat dan menjadi *soluble* aluminium (Liu *et al.*, 2010).

Proses elektrolisis adalah proses reduksi dan oksidasi yang simultan, dimana diperlukan beberapa parameter untuk menentukan keberhasilan proses reduksi dan oksidasi pada masing-masing kompartemen berelektroda. Parameter lain yang digunakan untuk mengukur keberhasilan proses adalah TDS. TDS adalah padatan terlarut yang terkandung pada air limbah yang dapat menghantarkan listrik.

TDS pada awal memang tinggi, kemudian berangsur-angsur turun seiring berjalannya waktu operasi. Pada konfigurasi dengan membran CEM terjadi penurunan TDS pada limbah dan peningkatannya pada kompartemen berisi buffer karena buffer yang sebelumnya tidak ada ion penghantar listrik, mendapat kation dari limbah tersebut.

Selain nilai pH dan TDS, diperlukan analisis nilai tegangan listrik selama proses elektrolisis berlangsung. Penurunan TDS secara umum akan mengakibatkan kenaikan tegangan listrik karena hambatan yang naik (Bard dan Faulkner, 2001). Perubahan nilai TDS dan tegangan listrik pada konfigurasi menggunakan membran CEM dengan variasi jarak elektroda dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.

Pada **Gambar 4.7** variasi jarak elektroda 1 cm menunjukkan adanya kenaikan nilai TDS pada kompartemen katoda yang signifikan, kenaikan mencapai 100% pada akhir proses elektrolisis. Sementara pada kompartemen anoda terdapat penurunan nilai TDS sebesar 47% di akhir proses. Hal tersebut menandakan bahwa kation-kation yang terkandung pada air limbah telah banyak berpindah pada kompartemen katoda



Gambar 4. 7 Fluktuasi nilai TDS dan Tegangan Listrik pada Konfigurasi Reaktor Membran CEM

Gambar 4.7 pada variasi jarak elektroda 1 cm menunjukkan adanya kenaikan nilai TDS pada kompartemen katoda yang signifikan, kenaikan mencapai 100% pada akhir proses elektrolisis. Sementara pada kompartemen anoda terdapat penurunan nilai TDS sebesar 47% di akhir proses. Hal tersebut menandakan bahwa kation-kation yang terkandung pada air limbah telah banyak berpindah pada kompartemen katoda.

Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm didapati kenaikan TDS pada kompartemen katoda sebesar 93% dan penurunan nilai TDS pada kompartemen anoda sebesar 59% di akhir proses. Kemudian, pada jarak elektroda 0,2 cm ditemukan nilai TDS kompartemen katoda naik sebesar 55% pada jam kesepuluh dan TDS kompartemen anoda turun sebesar. Kenaikan nilai TDS yang lebih besar pada jarak elektroda yang lebih besar dikarenakan adanya nilai tegangan listrik yang lebih besar menyebabkan

proses reduksi menghasilkan lebih banyak OH^- . Pada TDS, ion H^+ dan OH^- juga terbaca sebagai TDS.

Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada penggunaan membran CEM, fluktuasi pH lebih dipengaruhi oleh proses reduksi dan oksidasi daripada transport H^+ dan OH^- (Rozendal *et al.*, 2007).

Kenaikan tegangan listrik pada variasi jarak elektroda 1 cm mulai besar pada jam operasi keenam menjadi 14,4 Volt, sementara kenaikan TDS pada jam kedelapan sebesar 78% di kompartemen katoda. Hal tersebut dikarenakan energi yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik digunakan untuk proses reduksi dan berakibat naiknya nilai pH.

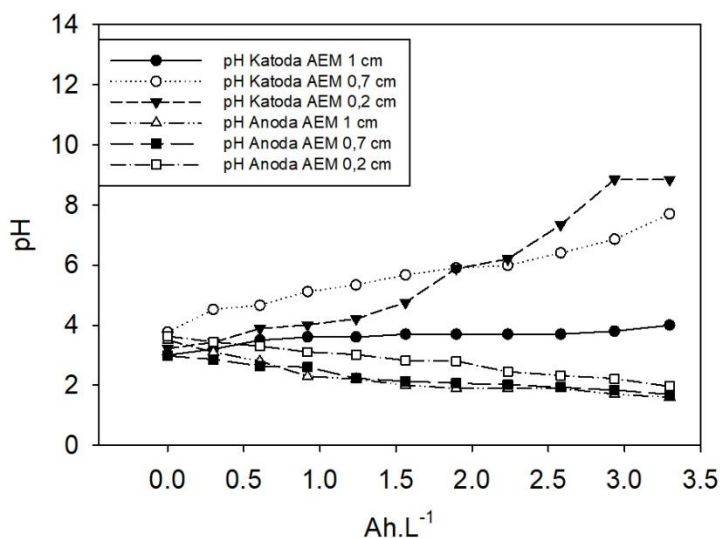
Sementara itu, tegangan listrik pada variasi jarak 0,7 cm terdapat kenaikan nilai tegangan listrik pada jam kelima menjadi 14,4 Volt, simultan dengan kenaikan nilai TDS sebesar 74% pada kompartemen katoda.

Tegangan listrik yang cenderung konstan pada variasi jarak 0,2 cm disebabkan oleh adanya kenaikan TDS di satu sisi akan menaikkan tegangan listrik tetapi kenaikan pH akan menurunkan tegangan listrik (Rozendal *et al.*, 2007).

4.3.4. Anion Exchange Membrane

Variasi penggunaan membran berikutnya adalah dengan konfigurasi penggunaan *Anion Exchange Membrane* dengan variasi jarak antar elektroda yang digunakan adalah 0,2 cm, 0,7 cm dan 1 cm. Hasil dari perubahan pH kompartemen katoda maupun anoda pada jarak 1 cm, 0,7 cm dan 0,2 cm dapat dilihat pada **Gambar 4.8**. Sementara data pengamatan nilai pH dan TDS untuk konfigurasi membran AEM dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 2.9 - Tabel 2.15.

Pada **Gambar 4.8**, menunjukkan adanya perubahan pH pada kompartemen katoda dan kompartemen anoda. Pada katoda, ion-ion di dalamnya adalah kation yang akan melakukan reduksi, sehingga terdapat kenaikan pH di kompartemen katoda. Sementara pada kompartemen anoda ada oksidasi yang merupakan reaksi pelepasan elektron untuk ditangkap oleh anoda, sehingga menyebabkan penurunan pH (Varcoe *et al.*, 2014).



Gambar 4. 8 pH dan tegangan listik pada penggunaan AEM

Penelitian pada jarak elektroda 1 cm juga menunjukkan adanya kenaikan nilai pH pada kompartemen katoda dari awalnya 3,00 kemudian menjadi 3,20; 3,50; 3,60; 3,60; 3,70; 3,70; 3,70; 3,70 pada jam kedua hingga kedelapan. Pada jam kesembilan dan kesepuluh menjadi 3,80 dan 4,00. Pada kompartemen anoda terdapat penurunan pH yaitu dari awal nya 3,50 menjadi 3,10; 2,8; 2,3; 2,20; 2,00; 1,90; 1,90; 1,90 dan 1,70 pada jam pertama hingga jam kesembilan. Dan di akhir jam operasi menjadi 1,60.

Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm juga terdapat kenaikan pH pada kompartemen katoda dari yang awalnya 3,77 pada jam pertama hingga akhir operasi menjadi 4,52; 4,66; 5,11; 5,33; 5,67; 5,90; 5,99; 6,41; 6,86; 7,70. sementara pada kompartemen anoda terjadi pula penurunan nilai pH masing masing dari 2,98 menjadi 2,86 dan 2,63 pada jam kedua kemudian 2,60; 2,23; 2,13; 2,07; 2,01; 1,93; 1,84 pada jam ketiga hingga kesembilan dan 1,69 pada akhir proses elektrolisis.

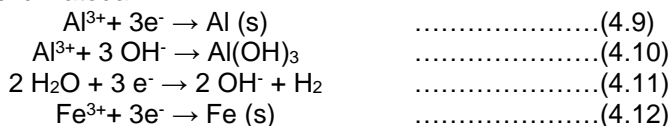
Penelitian pada jarak elektroda 0,2 cm juga menunjukkan adanya kenaikan nilai pH pada kompartemen katoda dari awalnya 3,22 kemudian menjadi 3,43 ;3,89; 4,01; 4,21; 4,75; 5,88; 6,21; 7,34 pada jam kedua hingga kedelapan. Pada jam kesembilan

dan kesepuluh menjadi 8,85 dan 8,85. Pada kompartemen anoda terdapat penurunan pH yaitu dari awalnya 3,63 menjadi 2,43; 3,30; 3,10; 3,02; 2,82; 2,80; 2,45; 2,33; 2,22 pada jam pertama hingga jam kesembilan. Dan di akhir jam operasi menjadi 1,96.

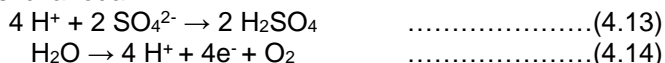
Variasi jarak antar elektroda menyebabkan perbedaan resistensi pada proses elektrolisis. Hal ini yang menyebabkan pH pada masing-masing variasi berbeda. Resistensi berkaitan erat dengan tegangan listrik. Dimana tegangan listrik dalam penelitian ini merupakan energi yang diperlukan untuk melakukan reduksi maupun oksidasi.

Berdasarkan fluktuasi hasil pH baik pada katoda dan anoda, kemungkinan reaksi kimia yang terjadi pada kompartemen katoda dan anoda adalah sebagai berikut:

Reaksi di katoda :



Reaksi di anoda :



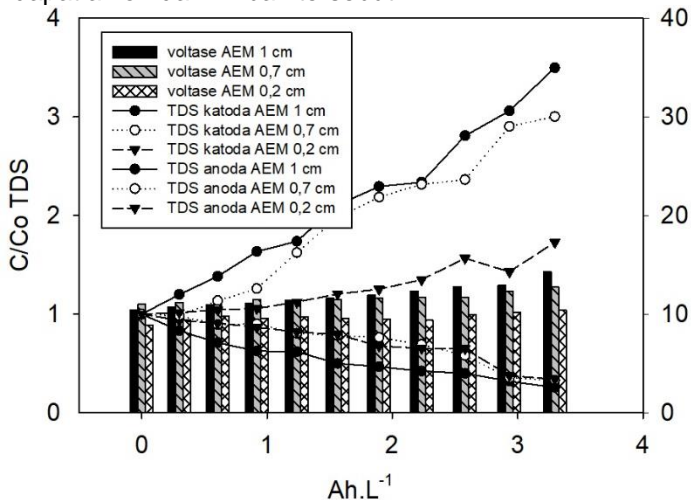
(Christensen *et al.*, 2005)

Adanya kenaikan pH di kompartemen katoda disebabkan oleh adanya pelepasan elektron pada proses reduksi. Pada reaksi di katoda, dihasilkan Al(OH)_3 yang merupakan presipitat aluminium. Pada variasi AEM, dihasilkan presipitat aluminium berwarna putih pada *feed tank*. Indikasi adanya presipitat adalah adanya separasi pada hasil *centrifuge* menjadi natan dan supernatan. Kenaikan pH juga disebabkan pula karena adanya reduksi H_2O menghasilkan OH^- (Chen *et al.*, 2000).

Pada penggunaan AEM, *electroneutrality* berasal dari reduksi air yang terdifusi pada membran AEM dari katoda menuju anoda dan dikarenakan ion hidroksil memiliki molar yang sama dengan transfer elektron maka pH cenderung naik (Rozendal *et al.*, 2007).

Variasi penggunaan membran dan jarak elektroda juga mempengaruhi perubahan nilai TDS serta tegangan listrik. Menurut Chen *et al.* (2002), adanya perubahan TDS menyebabkan adanya perubahan besarnya tegangan listrik. Fluktuasi nilai TDS

dan tegangan listrik dapat dilihat pada **Gambar 4.9**. Pada konfigurasi dengan membran AEM terjadi penurunan TDS pada limbah dan peningkatannya pada kompartemen berisi buffer karena buffer yang sebelumnya tidak ada ion penghantar listrik, mendapat anion dari limbah tersebut.



Gambar 4. 9 pH dan tegangan listrik pada penggunaan AEM

Pada **Gambar 4.9** pada variasi jarak elektroda 1 cm menunjukkan adanya kenaikan nilai TDS pada kompartemen anoda yang signifikan, kenaikan mencapai 100% pada akhir proses elektrolisis. Sementara pada kompartemen katoda terdapat penurunan nilai TDS sebesar 75% di akhir proses. Hal tersebut menandakan bahwa anion-anion yang terkandung pada air limbah telah banyak berpindah pada kompartemen anoda.

Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm didapati kenaikan TDS pada kompartemen anoda sebesar 100% dan penurunan nilai TDS pada kompartemen katoda sebesar 67% di akhir proses. Kemudian, pada jarak elektroda 0,2 cm ditemukan nilai TDS kompartemen anoda naik sebesar 73% pada jam kesepuluh dan TDS kompartemen katoda turun sebesar 66%. Penurunan nilai TDS kompartemen katoda yang lebih besar pada jarak elektroda yang lebih besar dikarenakan adanya nilai tegangan listrik yang lebih besar menyebabkan proses reduksi menghasilkan lebih banyak OH^- . Pada TDS, ion H^+ dan OH^- juga terbaca sebagai TDS.

Kenaikan tegangan listrik juga merupakan salah satu indikasi keberhasilan proses elektrolisis. Karena sumber daya hantar listrik dalam hal ini adalah TDS pada larutan elektrolit telah tereduksi di katoda, sehingga hambatan proses menjadi naik (Sopiah, 2008). Naiknya nilai hambatan listrik juga menyebabkan kenaikan nilai tegangan listrik. Ketika jarak elektroda diperbesar, maka kuat arus yang dibutuhkan akan lebih besar.

Kenaikan tegangan listrik pada variasi jarak elektroda 1 cm sebanyak 38% di akhir proses. Hal tersebut dikarenakan energi yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik digunakan untuk proses reduksi dan berakibat naiknya nilai pH.

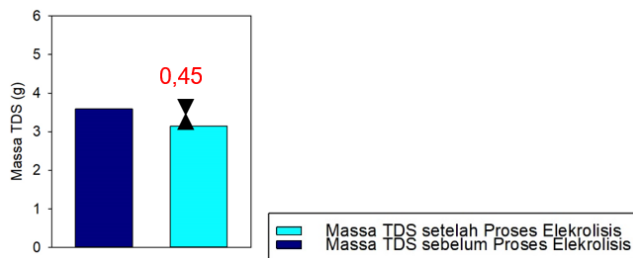
Sementara itu, tegangan listrik pada variasi jarak 0,7 cm terdapat kenaikan nilai tegangan listrik pada akhir operasi sebesar 16%. Tegangan listrik juga mengalami kenaikan 16% pada variasi jarak 0,2 cm disebabkan oleh adanya kenaikan TDS di satu sisi akan menaikkan tegangan listrik tetapi kenaikan pH akan menurunkan tegangan listrik (Rozendal et al., 2007).

Tetapi dalam penelitian ini, kuat arus dipertahankan untuk konstan pada 300mA, sehingga nilai tegangan listrik akan naik seiring dengan naiknya nilai hambatan listrik. Perubahan tersebut menurut Modirshahla *et al.* (2008) disebabkan oleh efek elektrostatik berhubungan dengan jarak elektroda, sehingga pergerakan ion akan lebih lambat dan akan menurunkan potensi adanya ion-ion yang mengendap maupun terdesposisi di katoda.

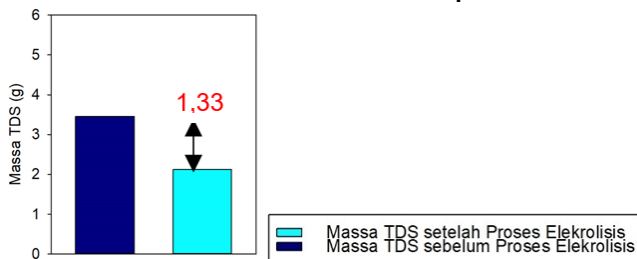
4.3.5. Massa TDS Tersisihkan

TDS merupakan salah satu parameter yang diperlukan untuk mengetahui keberhasilan proses elektrolisis. Pengukuran TDS menggunakan alat *conductivitymeter*. TDS merupakan pendekatan pengukuran ion-ion yang terlarut dalam sampel. TDS dapat merupakan natrium (garam), kalsium, magnesium, kalium, karbonat, nitrat, bikarbonat, klorida dan sulfat (Hallock dan Hallock, 1993).

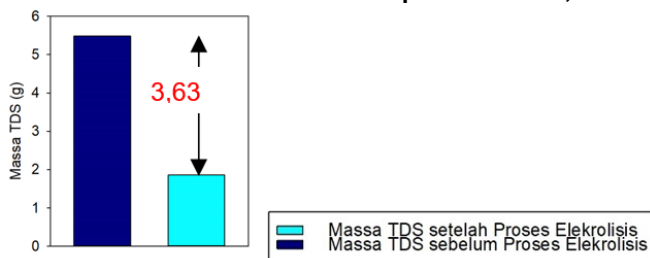
Data hasil analisis TDS tanpa penggunaan membran terlampir pada Lampiran B Tabel 4. 1- Tabel 4.4 untuk variasi jarak 1 cm, 0,7 cm, 0,2 cm. Sementara hasil kesetimbangan massa TDS masing masing variasi jarak dapat dilihat pada **Gambar 4.10** hingga **Gambar 4.12**.



Gambar 4. 10 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 1 cm



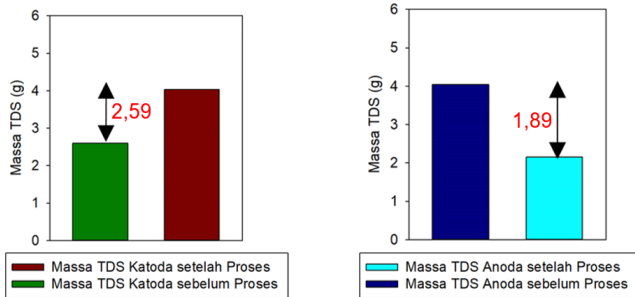
Gambar 4. 11 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 0,7cm



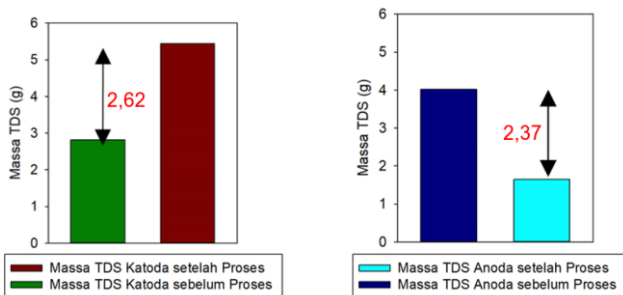
Gambar 4. 12 Massa TDS tersisihkan tanpa membran 0,2cm

Pada **Gambar 4.10** hingga **Gambar 4.12** menunjukkan bahwa penyisihan TDS terbesar ada pada variasi jarak 0,2 cm. Hal ini disebabkan karena tegangan berbanding lurus dengan arus. Jika tegangan diperbesar maka arus yang mengalir ke elektroda semakin besar yang mengakibatkan endapan semakin besar juga. Semakin besar massa endapan yang dihasilkan elektroda maka penurunan nilai TDS yang menjadi semakin besar. Penggunaan membran CEM menyebabkan perbedaan nilai TDS pada kedua kompartemen. Data hasil analisis TDS untuk variasi membran CEM terlampir pada Lampiran B Tabel 4. 5- Tabel 4.7 untuk variasi

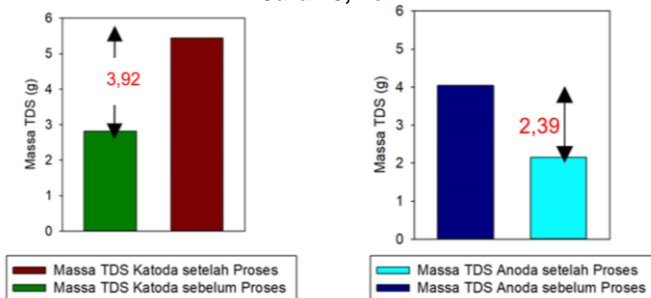
jarak 1 cm, 0,7 cm, 0,2 cm. Sementara hasil kesetimbangan massa TDS masing masing variasi jarak dapat dilihat pada **Gambar 4.13** hingga **Gambar 4.15**.



Gambar 4. 13 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 1 cm



Gambar 4. 14 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 0,7 cm

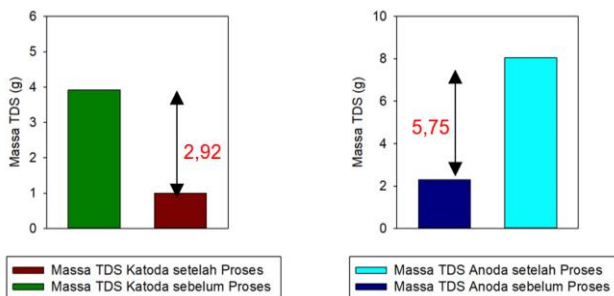


Gambar 4. 15 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran CEM Jarak 0,2 cm

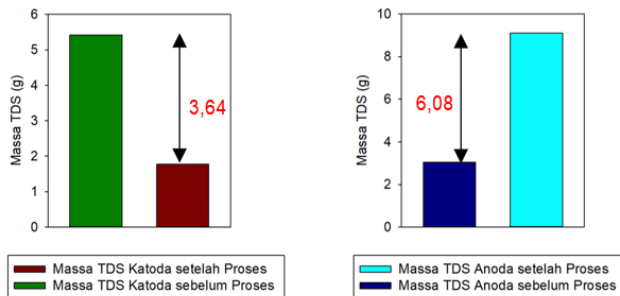
Pada kompartemen katoda TDS akan meningkat dikarenakan adanya kation yang berpindah. Sementara pada kompartemen anoda, nilai TDS akan mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan massa yang hilang dari TDS yang kemungkinan besar dikarenakan proses reduksi dan oksidasi pada elektroda

Pada tiga variasi jarak elektroda diketahui pada jarak 0,2 cm terdapat perpindahan ion terbesar. Hal tersebut dikarenakan terdapat perbedaan nilai potensial energi untuk melakukan reduksi dan oksidasi. Pengukuran TDS tidak membedakan ion (Weber-scannel dan Duffy, 2007). Angka yang tertera di atas diagram batang massa TDS pada kompartemen merupakan perbedaan. Semakin besar massa endapan yang dihasilkan elektroda maka penurunan nilai TDS yang menjadi semakin besar. (Nurajijah et al., 2014). Pada proses elektrolisis ini, tegangan listrik memiliki nilai yang fluktuatif, yang kemungkinan disebabkan oleh adanya pergerakan dari anion dan kation yang melewati membran tukar ion. (Widodo et al., 2010).

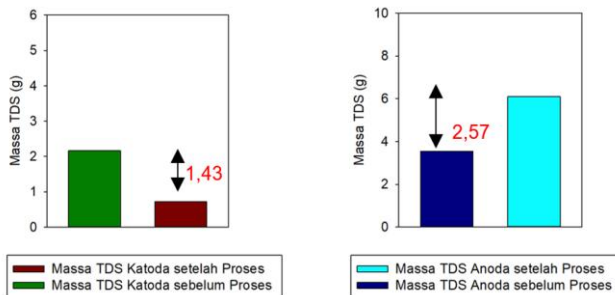
Variasi penggunaan membran berikutnya adalah dengan konfigurasi penggunaan *Anion Exchange Membrane* dengan variasi jarak antar elektroda yang digunakan adalah 0,2 cm, 0,7 cm dan 1 cm. Hasil dari perubahan TDS kompartemen katoda maupun anoda pada jarak 1 cm, 0,7 cm dan 0,2 cm dapat dilihat pada **Gambar 4.16** hingga **Gambar 4.18**. Sementara data pengamatan nilai TDS untuk konfigurasi membran AEM dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 4. 8- Tabel 4.10.



Gambar 4. 16 Massa TDS tersihkan pada variasi Membran AEM Jarak 1



Gambar 4. 17 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran AEM Jarak 0,7 cm



Gambar 4. 18 Massa TDS tersisihkan pada variasi Membran AEM Jarak 0,2 cm

Pada **Gambar 4.16** hingga **Gambar 4.18**, menunjukkan adanya perubahan TDS pada kompartemen katoda dan kompartemen anoda. Pada katoda, ion-ion di dalamnya adalah kation yang akan melakukan reduksi, sehingga terdapat penurunan nilai TDS di kompartemen katoda. Sementara pada kompartemen anoda ada oksidasi yang merupakan reaksi pelepasan elektron untuk ditangkap oleh anoda sehingga nilai TDS akan meningkat. Pada jarak elektroda 0,2 cm ditemukan nilai TDS paling besar perubahannya. Penurunan nilai TDS kompartemen katoda yang lebih besar pada jarak elektroda yang lebih besar dikarenakan adanya nilai tegangan listrik yang lebih besar menyebabkan proses reduksi menghasilkan lebih banyak OH^- . Pada TDS, ion H^+ dan OH^- juga terbaca sebagai TDS.

Hal ini disebabkan karena adanya seleksi ion dengan membran, sehingga kemampuan elektroda untuk penyisihan TDS

semakin baik juga (Varcoe *et al.*, 2014). Semakin besar massa endapan yang dihasilkan elektroda maka penurunan nilai TDS yang menjadi semakin besar. Selisih massa yang hilang pada TDS tidak linier dengan besar massa yang ada di elektroda karena H^+ dan OH^- juga terbaca sebagai TDS yang berpindah (Atekwana *et al.*, 2004).

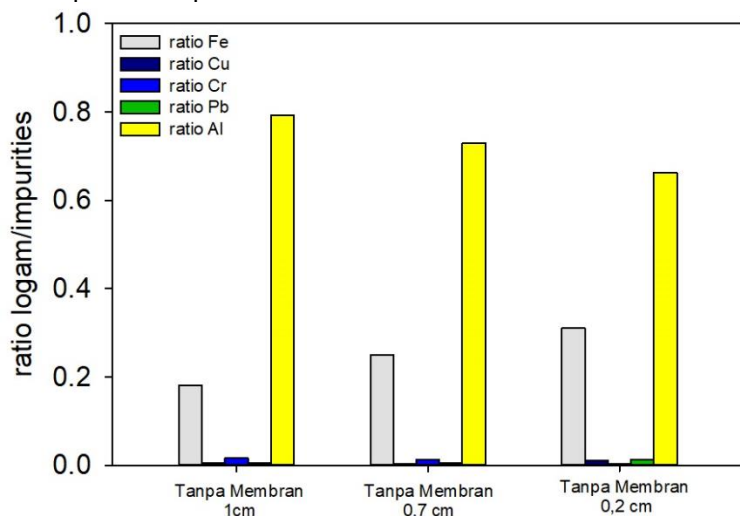
4.4 Presentase Komposisi Logam

Proses elektrolisis adalah sebuah mekanisme yang diharapkan dapat merubah ion aluminium yang terlarut pada filtrat menjadi padatan yang terdesposisi pada katoda dengan mekanisme reduksi. Menurut Abou-Shady *et al.* (2012), seluruh kation dapat terdesposisi di katoda. Kation-kation lain yang tertangkap di katoda selain ion logam aluminium disebut juga ion pengotor.

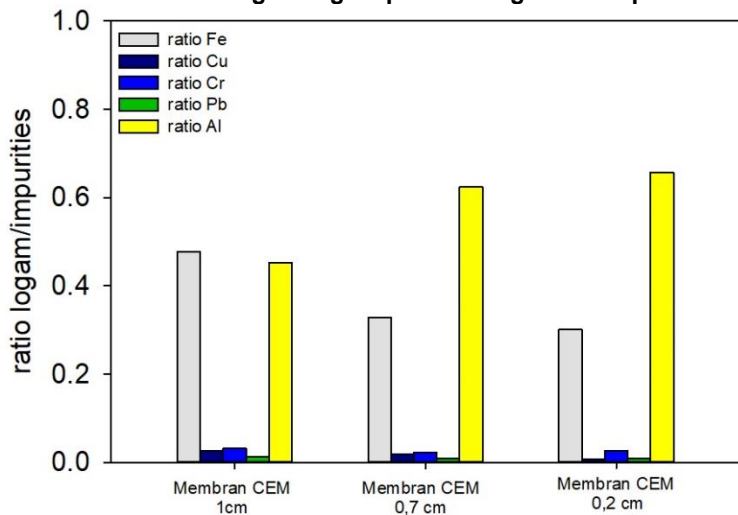
Pada penelitian ini, katoda yang telah menangkap ion-ion hasil reduksi kemudian dilarutkan dengan HNO_3 0,1 N dengan pH 3 sebanyak 50mL untuk kemudian dilakukan uji dengan ICP untuk menentukan kadar logam. Keberhasilan proses *recovery* dapat diperhitungkan dengan prosentase aluminium yang didapat. **Gambar 4.18**, **Gambar 4.19** untuk variasi tanpa membran, **Gambar 4.20** dengan variasi membran CEM dan **Gambar 4.21** untuk variasi penggunaan membran AEM. menggambarkan tentang prosentase kandungan ion logam yang berhasil tertahan pada katoda di masing-masing variasi.

Pada **Gambar 4.19**, Massa katoda yang didapat setelah proses elektrolisis pada konfigurasi tanpa penggunaan membran dan jarak elektroda 1 cm adalah sebesar 2,34 g. Hasil perbandingan parameter logam pada massa katoda didapat 18,1% ; 0,5% ; 1,6% ; 0,5% ; dan 79,3% kandungan untuk masing masing logam Fe, Cu, Cr, Pb, dan Al. Sementara pada variasi jarak 0,7 cm didapatkan berat katoda 2,2 g dan rasio logam masing masing adalah 25% ; 0,3% ; 1,3% ; 0,4% dan 73,0% untuk parameter Fe, Cu, Cr, Pb, dan Al. Sementara pada variasi 0,2 cm didapatkan berat katoda 2,03 g dan rasio masing-masing adalah 31,1% ; 1,1% ; 0,2% ; 1,3% ; dan 66,3%. Rasio Al dibanding dengan logam *impurities* terbaik ada pada variasi jarak elektroda sebesar 1 cm. Hal ini berkaitan dengan *solubility* Al^{3+} pada pH tertentu, dan pada variasi 1 cm diketahui pH terendah akhir proses (Bahena *et al.*, 2002). Variasi lain yang digunakan adalah dengan penggunaan

membran CEM pada jarak elektroda 1 cm, 0,7 cm, dan 0,2 cm. Dan dapat dilihat pada **Gambar 4.20** untuk variasi membran CEM.



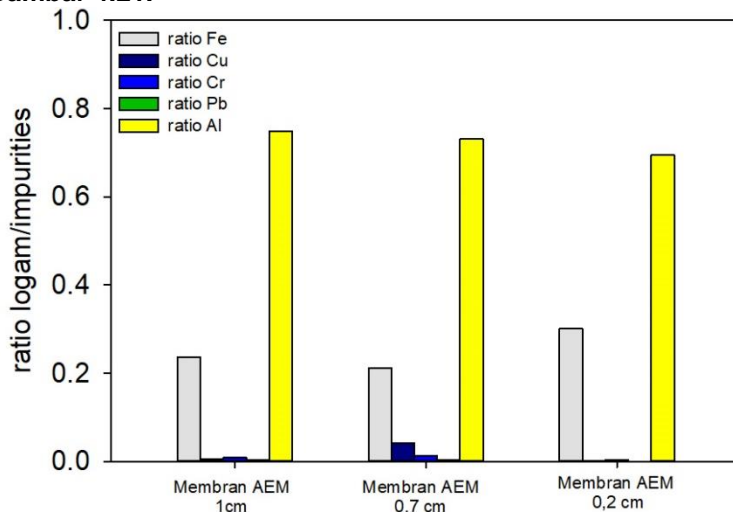
Gambar 4. 19 Kandungan Logam pada Konfigurasi Tanpa Membran



Gambar 4. 20 Kandungan Logam pada Konfigurasi Membran CEM

Pada **Gambar 4.20** massa katoda yang didapat setelah proses elektrolisis pada konfigurasi membran CEM dan jarak elektroda 1 cm adalah sebesar 1,12 g. Sementara pada jarak elektroda 0,7 cm dan 0,2 cm didapatkan 1,01 g dan 0,98 g. Hasil perbandingan parameter logam pada massa katoda didapat 63,6% ; 0,2% ; 0,3% ; 0,1% ; dan 46,6% kandungan untuk masing masing logam Fe, Cu, Cr, Pb, dan Al pada jarak elektroda 1 cm.

Pada jarak elektroda 0,7 cm diketahui rasio logam dengan *impurities* dari penempelan pada katoda adalah 32,9%; 1,8%; 2,2%; 0,8%; 62,3% untuk rasio Fe, Cu, Cr, Pb dan Al. Sementara pada jarak elektroda 0,2 cm rasio logam dengan *impurities* diketahui masing-masing adalah 24,8%; 0,1%; 0,6%; 0,1%; dan 74,5% untuk rasio Fe, Cu, Cr, Pb, dan Al. Rasio Al paling tinggi ada pada jarak elektroda 1 cm, hal tersebut berkaitan dengan nilai pH akhir proses elektrolisis (Bahena *et al.*, 2002). Konfigurasi reaktor yang lain adalah dengan menggunakan membran AEM dengan variasi jarak pada elektroda sebesar 1 cm; 0,7 cm dan 0,2 cm. Rasio Al dan logam *impurities* pada katoda dapat dilihat pada **Gambar 4.21**.



Gambar 4. 21 Kandungan Logam pada Konfigurasi Membran AEM

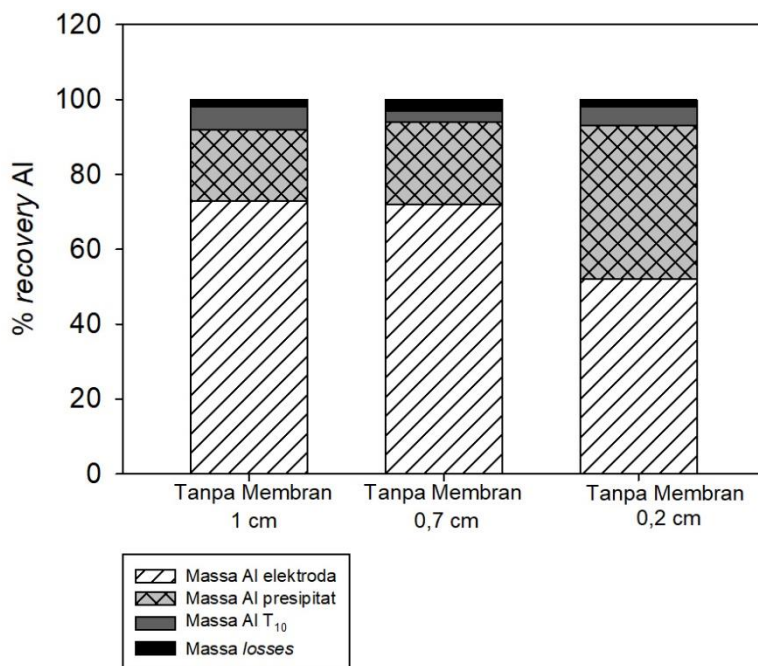
Massa katoda yang didapat setelah proses elektrolisis pada konfigurasi AEM dan jarak elektroda 1 cm adalah sebesar

3,86 g. Hasil masing-masing parameter dari ICP diketahui dalam satuan mg.L^{-1} kemudian dikonversi menjadi satuan g dan dibandingkan dengan keseluruhan massa katoda. Kemudian didapat 23,6% ; 0,5% ; 0,9% ; 0,3% ; dan 74,7% kandungan untuk masing masing logam Fe, Cu, Cr, Pb, dan Al. Sementara pada jarak 0,7 cm didapat massa katoda sebesar 3,45 g. Hasil perbandingan logam dan *impurities* didapat masing-masing adalah 21,2%; 4,1%; 1,3%; 0,4% dan 73,1% untuk logam Fe, Cu, Cr, Pb dan Al. Sedangkan pada jarak elektroda 0,2 cm diketahui masing-masing adalah 30,1%, 0,2%, 0,3%, 0,1 %, 69,4% untuk logam Fe, Cu, Cr, Pb, Al. Perbedaan prosentase logam yang tertangkap pada katoda bergantung dengan kondisi pH akhir karena berkaitan dengan kelarutan logam pada pH tertentu.

Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrolisis tidak dapat melakukan seleksi terhadap kation yang dapat tereduksi di katoda. Berdasarkan **Gambar 4.19** hingga **Gambar 4.21**, diketahui bahwa prosentase adanya logam aluminium terbesar ada pada konfigurasi AEM dan jarak 1 cm yaitu sebesar 74,7% kemudian pada variasi tanpa membran sebesar 79,3% dan pada konfigurasi CEM sebanyak 74,5%. Penggunaan CEM menunjukkan adanya prosentase Fe terbesar yang berhasil tertangkap di katoda sebesar 63,6%. Karena mekanisme konfigurasi CEM adalah filtrat dimasukkan pada kompartemen anoda kemudian kation yang terdapat pada filtrat akan pindah ke kompartemen katoda melalui CEM. Kation-kation yang telah berpindah kemudian melakukan reduksi pada katoda. Penggunaan AEM dapat memaksimalkan efisiensi *recovery* aluminium karena dapat mengurangi adanya anion yang mengganggu proses elektrolisis (Varcoe *et al.*, 2014).

4.5 Perhitungan Keseimbangan Massa

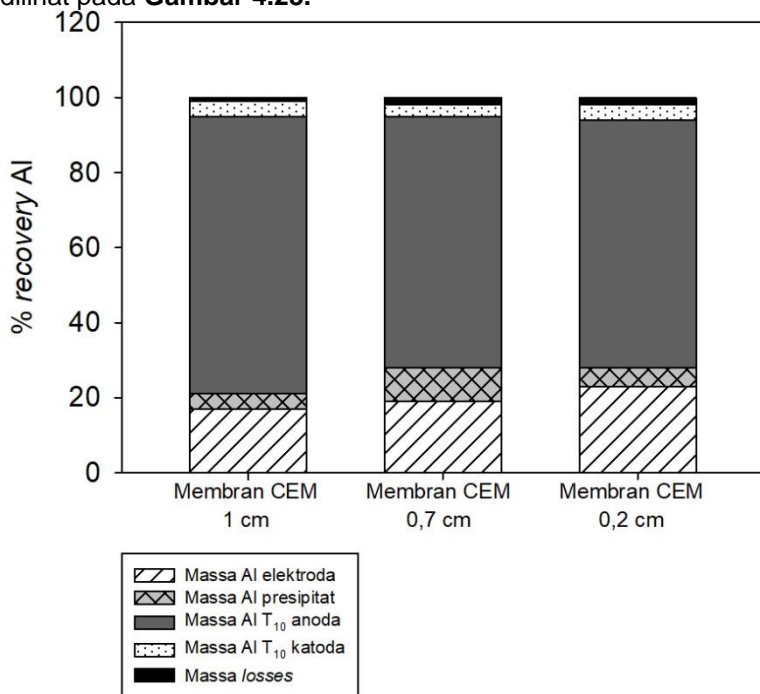
Keberhasilan proses elektrokimia ditentukan dari *recovery* yang didapat pada katoda. Pada perhitungan *Keseimbangan Massa* dilakukan perhitungan *recovery* aluminium pada masing-masing variasi. Keseimbangan massa pada konfigurasi tanpa membran dapat dilihat pada **Gambar 4.22** sementara data perhitungan dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 3. 1.



Gambar 4. 22 Kestimbangan Massa Al Konfigurasi Tanpa Membran

Pada **Gambar 4.22** ditunjukkan bahwa pada *recovery* terbesar yang berhasil ditangkap di katoda adalah dengan jarak elektroda 1 cm dan 0,7 cm yaitu sebesar 75% dan 73%. Sementara pada jarak elektroda 0,2 cm diketahui *recovery* pada katoda didapati sebesar 53%. Sementara *recovery* pada presipitat dengan jarak elektroda 1 cm, 0,7 cm, dan 0,2 cm masing masing adalah 20%, 17%, dan 42%. Hal tersebut menunjukkan bahwa $\text{Al}(\text{OH})_3$ dapat terbentuk menjadi presipitat berwarna putih (Christensen *et al.*, 2005). Penempelan yang terdapat di katoda berkaitan erat dengan pH pada akhir proses. Pada akhir proses elektrolisis, diketahui massa aluminium di kompartemen dengan jarak elektroda 1 cm didapati sebesar 3%. Dan pada jarak elektroda 0,7 cm dan 0,2 cm adalah sebesar 6% dan 2%. Hal tersebut menandakan bahwa Al dapat direduksi lebih maksimal pada jarak elektroda 0,2 cm. Dapat disimpulkan, bahwa semakin dekat jarak elektroda menyebabkan tegangan listrik lebih kecil

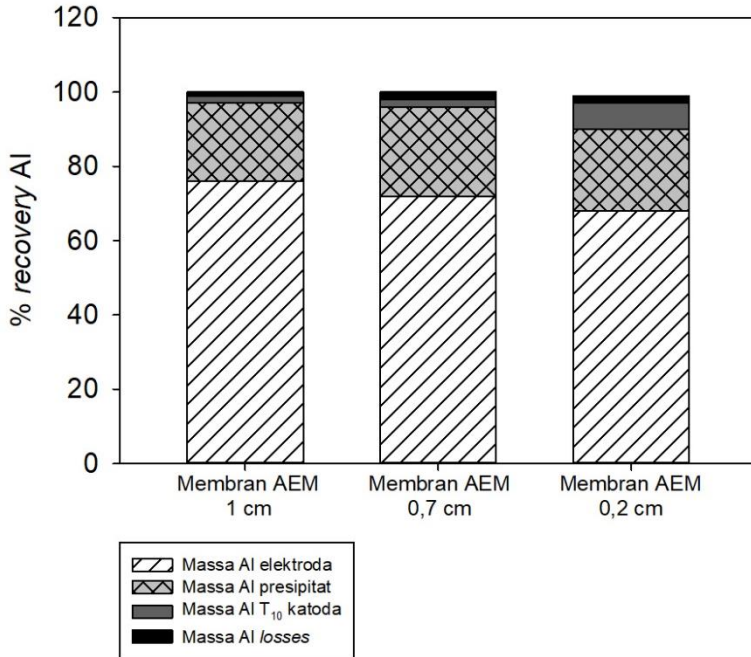
sehingga dapat memaksimalkan proses reduksi. Sedangkan penempelan ion pada katoda dipengaruhi oleh pH akhir proses. Kesetimbangan massa aluminium juga dihitung pada konfigurasi dengan membran CEM. *Kesetimbangan Massa* dengan konfigurasi membran CEM pada variasi jarak elektroda dapat dilihat pada **Gambar 4.23**.



Gambar 4. 23 Kesetimbangan Massa Al pada Konfigurasi CEM

Pada **Gambar 4.23** diketahui bahwa *recovery* untuk jarak elektroda 1 cm, 0,7 cm dan 0,2 cm pada katoda adalah sebesar 17%, 20%, dan 23%. pH akhir proses berpengaruh pada terbentuknya Al^{3+} pada katoda maupun reduksi Al sendiri. pH akhir pada variasi jarak elektroda 0,2 cm adalah yang terendah. Pada kompartemen katoda terdapat nilai *recovery* Al sebesar 75%, 67% dan 66% untuk jarak elektroda 1cm, 0,7 cm dan 0,2 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya $Al(OH)_4^-$ pada kompartemen katoda menyebabkan tidak terbentuknya presipitat (Chen *et al.*,

2000). Menurut Bahena *et al.*(2002), kelarutan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ semakin besar pada pH yang semakin basa. Sementara itu untuk konfigurasi dengan membran AEM, kesetimbangan massa pada variasi jarak elektroda dapat dilihat pada **Gambar 4.24**.

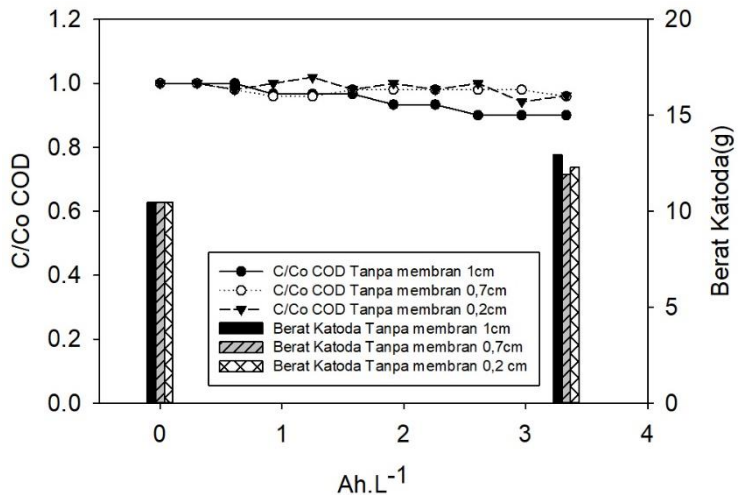


Gambar 4. 24 Kesetimbangan Massa Al Konfigurasi AEM

Gambar 4.24 menunjukkan nilai *recovery* pada katoda adalah 76%, 74% dan 72% pada variasi jarak elektroda 1cm, 0,7cm dan 0,2 cm. Sementara *recovery* pada presipitat diketahui 21%, 21% dan 19% pada jarak elektroda 1 cm, 0,7 cm, dan 0,2 cm. Adanya logam yang menempel di katoda berkaitan erat dengan pH akhir proses. Sementara massa pada presipitat pada jarak elektroda lebih dekat lebih kecil dikarenakan OH^- yang ada di kompartemen katoda akan besar dikarenakan adanya efek dari tegangan listrik yang disebabkan oleh jarak elektroda (Chen *et al.*, 2002). Sengupta (2002) menemukan bahwa pH akhir proses yang rendah menyebabkan presipitat akan kembali lagi menjadi ion terlarut.

4.6 Kebutuhan Energi

Kelayakan proses elektrokimia/elektrolisis tidak hanya ditentukan dari efektifitas penurunan konsentrasi polutan, tapi juga dari efisiensi pengolahan berdasarkan konsumsi energi spesifik (Anglada *et al.*, 2009). Sesuai dengan penjelasan sebelumnya proses elektrolisis juga dapat mengoksidasi bahan organik pada limbah (Saputra, 2016). Sehingga, pada akhirnya akan mengurangi efisiensi pengolahan, berupa reduksi logam aluminium karena mobilitas ion berkurang. Oleh karena hal tersebut, perlu dilakukan perbandingan untuk energi yang digunakan dalam proses oksidasi organik ataupun reduksi ion-ion logam. Pada **Gambar 4.25**, dijelaskan korelasi antara penyisihan COD dan massa aluminium yang dihasilkan pada konfigurasi tanpa membran dengan jarak tertentu. Kemudian **Gambar 4.26** terdapat perbandingan antara penyisihan COD dan massa aluminium yang dihasilkan pada konfigurasi CEM. **Gambar 4.27** membandingkan antara penyisihan COD dan massa aluminium yang didapat pada konfigurasi AEM dan jarak elektroda 1 cm dan 0,7 cm .

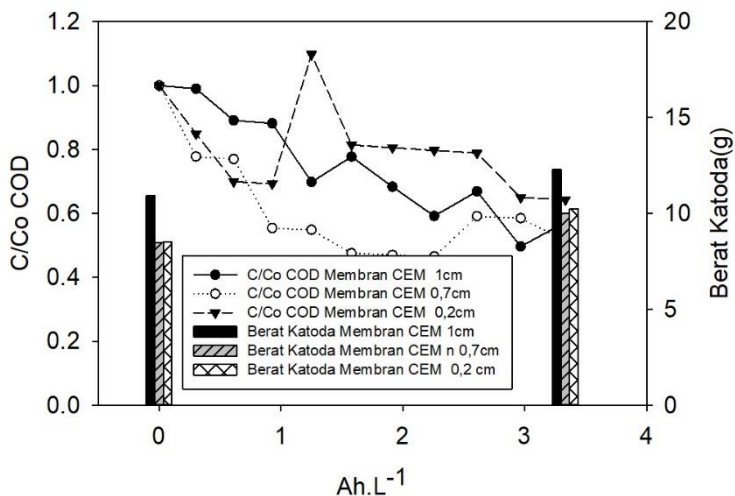


Gambar 4. 25 Penyisihan COD dan padatan aluminium pada konfigurasi tanpa membran

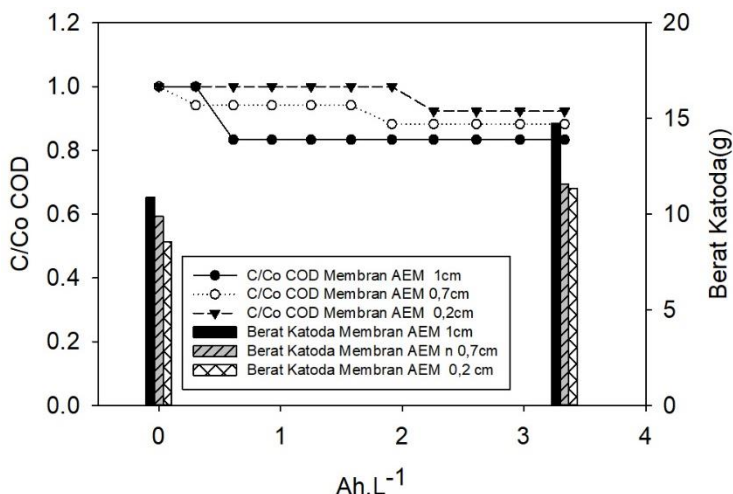
Pada **Gambar 4.25**, dimana variasi tanpa penggunaan membran dan jarak elektroda 1 cm; 0,7 cm ; 0,2 cm menunjukkan

penyisihan COD masing masing sebesar 19%, 13,6%, 13,4% hingga jam ke-10 pada muatan listrik spesifik sebesar 3,3 Ah. L⁻¹. Sementara itu, pada massa aluminium yang terdapat pada katoda mengalami penambahan sebesar 3,4%; 7,6%; dan 12,7% untuk jarak elektroda 1 cm; 0,7 cm ; dan 0,2 cm.

Pada **Gambar 4.26**, merupakan konfigurasi variasi CEM dan jarak elektroda 1 cm, menunjukkan penyisihan COD sebesar 13,6% hingga jam ke-10 pada muatan listrik spesifik sebesar 3,3 Ah. L⁻¹. Sementara itu, pada massa aluminium yang terdapat pada katoda mengalami penambahan sebesar 1,6% .Sementara pada **Gambar 4.27**, dimana merupakan variasi konfigurasi AEM dan jarak elektroda 1 cm; 0,7 cm menunjukkan penyisihan COD masing masing sebesar 2,6%; 0,8% hingga jam ke-10 pada muatan listrik spesifik sebesar 3,3 Ah. L⁻¹. Sementara itu, pada massa aluminium yang terdapat pada katoda mengalami penambahan sebesar 4,1% dan 4,9% untuk jarak elektroda 1 cm; 0,7 cm .



Gambar 4. 26 Penyisihan COD dan berat katoda dengan CEM



Gambar 4. 27 Penyisihan COD dan berat katoda dengan AEM

Perbandingan konsumsi energi spesifik untuk oksidasi dan reduksi didapat dengan pendekatan melalui perhitungan *Instantaneous Current Efficiency (ICE)* untuk proses reduksi aluminium dapat dilakukan pendekatan dengan persamaan sebagai berikut :

$$ICE = \frac{3 \times F \times V \times [(Al)t - (Al)t + \Delta t]}{I \times \Delta t} \quad \dots\dots\dots(4.15)$$

Keterangan :

F = Nilai Faraday , 96.500 C/mol

V = Volume elektrolit yang diolah (L)

I = Kuat Arus Listrik (A)

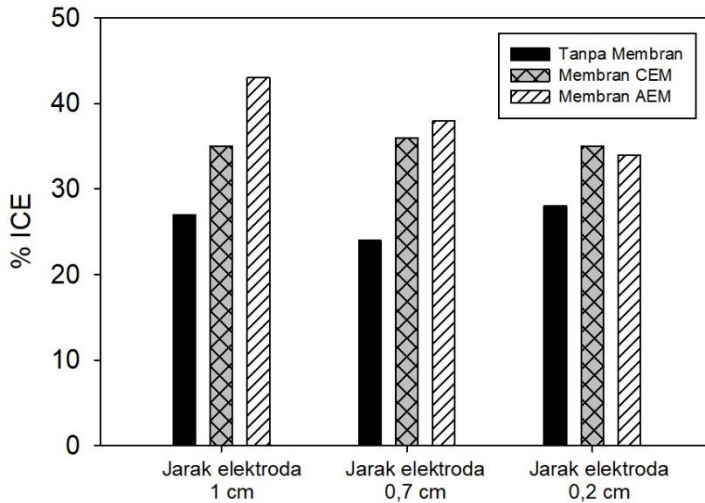
Δt = Selisih waktu operasional (jam)

Proses reduksi pada katoda kemungkinan mengalami reaksi sebagai berikut :



Diketahui 3 adalah nilai ekuivalen elektron per mol Al.

Nilai ICE pada proses reduksi untuk masing- masing variasi dapat dilihat pada **Gambar 4.28**.



Gambar 4. 28 ICE reduksi masing masing variasi

Berdasarkan **Gambar 4.28**, diketahui ICE reduksi pada variasi jarak elektroda 1 cm adalah 27%, 24% dan 27% untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM. Sementara untuk jarak elektroda 0,7 cm diketahui nilai ICE pada konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM masing-masing sebesar 35%, 36% dan 35%. Pada jarak elektroda 0,2 cm diketahui nilai ICE untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM adalah sebesar 43%, 38% dan 34%.

Nilai ICE terbesar adalah dengan konfigurasi membran AEM dan jarak elektroda 1 cm. Hal ini dikarenakan penggunaan membran AEM dapat melewati anion pada filtrat menuju kompartemen anoda sehingga energi pada kompartemen katoda akan terfokus untuk reduksi. Jarak elektroda berpengaruh pada tegangan listrik yang dihasilkan dan berhubungan dengan nilai potensial reduksi (Panniza *et al.*, 2001). Selain ICE untuk reduksi, diperlukan pula ICE untuk oksidasi. ICE untuk proses oksidasi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$ICE = \frac{4 \times F \times V \times [(COD)t - (COD)t + \Delta t]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(4.16)$$

Keterangan :

F = Nilai Faraday , 96.500 C/mol
V = Volume elektrolit yang diolah (L)
I = Kuat Arus Listrik (A)

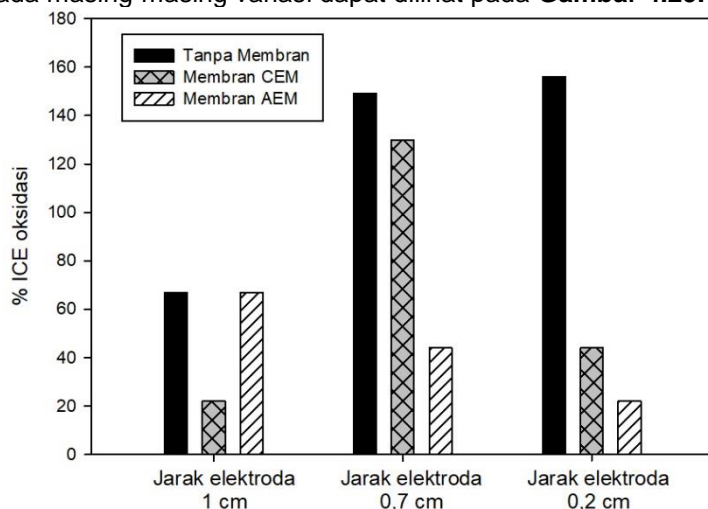
Δt = Selisih waktu operasional (jam)

Dimana, pada pengukuran COD pendekatan yang dilakukan adalah dengan bantuan oksigen yang terukur untuk mengoksidasi zat organik yang ada pada sampel, kemudian *Pottasium Dichromate* ($K_2Cr_2O_7$) mengukur O_2 yang dibutuhkan.

Karena oksigen yang berpengaruh dalam mekanisme ini, maka untuk mengetahui nilai ekuivalen untuk oksigen pada digunakan reaksi berikut :



Diketahui 4 adalah nilai ekuivalen elektron per mol O_2 . Hasil perhitungan nilai ICE oksidasi dengan pendekatan COD pada masing-masing variasi dapat dilihat pada **Gambar 4.29**.



Gambar 4. 29 ICE oksidasi COD masing masing variasi

Gambar 4.29 menunjukkan nilai ICE oksidasi pada variasi jarak elektroda 1 cm adalah 67%, 149% dan 156% untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM. Sementara untuk jarak elektroda 0,7 cm diketahui nilai ICE pada konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM masing-masing sebesar 22%, 130% dan 44%. Pada jarak

elektroda 0,2 cm diketahui nilai ICE untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM adalah sebesar 67%, 44% dan 22%.

Dari keseluruhan uji reaktor, nilai ICE untuk oksidasi organik dengan COD paling besar terjadi pada variasi tanpa membran dan jarak elektroda 0,2 cm yaitu sebesar 150%. Nilai ICE maksimal adalah 1, yaitu 100% (Panniza *et al.*, 2001). Hal tersebut diprediksi karena adanya senyawa organologam pada filtrat yang dianalisis dengan pendekatan COD. Menurut Herná'ndez *et al.* (1998), organologam adalah senyawa kimia yang mengandung ikatan antara karbon dan logam. Adanya kandungan organometal dalam sebuah sampel menyebabkan kandungan organik pada sampel tidak dapat terbaca, maka dari itu diperlukan pembacaan dengan mekanisme pembacaan total karbon (MacCrehan *et al.*, 1977). Pada penelitian ini analisis zat organik dengan menggunakan *Total Organic Carbon* (TOC). TOC digunakan untuk mengukur kandungan organik karbon dalam sampel. Hasil dari analisis TOC pada filtrat awal adalah sebesar 295,8 mg/L. Sementara hasil TOC pada seluruh variasi dapat dilihat pada **Tabel 4.2.**

Tabel 4. 2 Hasil Uji TOC

	AEM	CEM	Tanpa Membran
1 cm	266,4	256,2	151,2
0,7 cm	273,6	236,8	188,7
0,2 cm	281,1	224,7	192

$$ICE = \frac{4 \times F \times V \times [(TOC)_t - (TOC)_{t+\Delta t}]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(4.18)$$

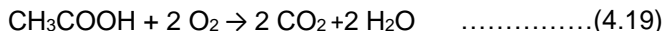
Keterangan :

- F = Nilai Faraday , 96.500 C/mol
- V = Volume elektrolit yang diolah (L)
- I = Kuat Arus Listrik (A)

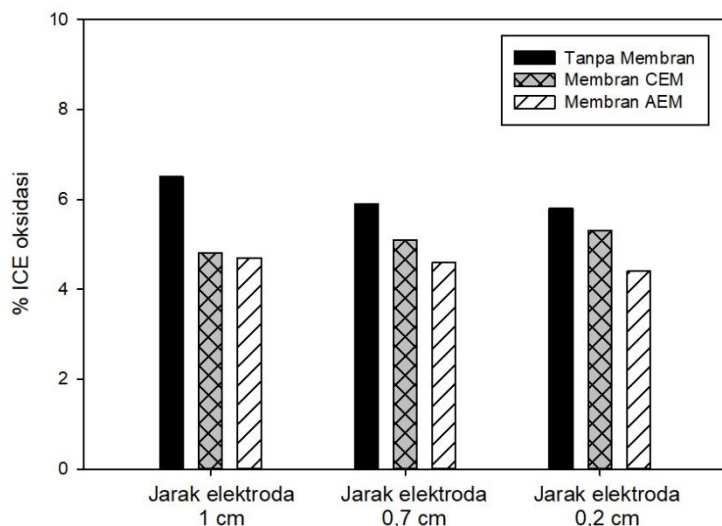
Δt = Selisih waktu operasional (jam)

Dimana, analisis *Total Organic Carbon* (TOC) adalah metode analisis yang digunakan untuk menjelaskan pengukuran kontaminan organik dengan pendekatan jumlah karbon.

Karena karbon yang berpengaruh dalam mekanisme ini, maka untuk mengetahui nilai ekuivalen untuk karbon pada digunakan reaksi berikut :



Pada reaksi 4.19, besaran muatan listrik yang digunakan untuk mekanisme oksidasi pada lumpur alum adalah 4 (Serikawa, 2010). Sehingga hasil perhitungan ICE untuk oksidasi organik dapat dilihat pada **Gambar 4.30**.



Gambar 4. 30 ICE oksidasi organik

Pada **Gambar 4.30** menunjukkan nilai ICE oksidasi pada variasi jarak elektroda 1 cm adalah 6,5%, 5,9% dan 5,8% untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM. Sementara untuk jarak elektroda 0,7 cm diketahui nilai ICE pada konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM masing-masing sebesar 4,8%, 5,1% dan 5,3%. Pada jarak elektroda 0,2 cm diketahui nilai ICE untuk konfigurasi tanpa membran, membran CEM dan membran AEM adalah sebesar 4,7%, 4,6% dan 4,4%.

Penurunan kadar organik tertinggi pada konfigurasi tanpa membran dengan jarak elektroda 1 cm. Hal tersebut dikarenakan penggunaan membran dapat melakukan seleksi terhadap kation

dan anion sehingga dapat memaksimalkan proses reduksi dan oksidasi. Oksidasi zat organik terjadi pada konfigurasi membran CEM dan tanpa membran. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan nilai TOC pada konfigurasi AEM yang tidak mengalami penurunan yang besar.

Hasil dari pendekatan analisis dengan TOC membuktikan bahwa analisis COD tidak dapat digunakan. Kesimpulan yang dapat ditarik adalah bahwa kandungan organik pada filtrat tidak mengganggu proses elektrolisis dikarenakan energi yang dibutuhkan untuk oksidasi organik di bawah 10% (Panniza *et al.*, 2001).

4.7 Komparasi Konfigurasi Optimum

Pada penelitian ini penggunaan membran dan jarak pada elektroda digunakan sebagai variasi penelitian guna meningkatkan efisiensi *recovery* aluminium. Efektivitas *recovery* ditentukan berdasarkan persentase *recovery* Al pada elektroda dan persentase energi yang dibutuhkan untuk reduksi. Tabel komparasi konfigurasi optimum dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Komparasi Penggunaan Membran

Variasi	% <i>recovery</i> Al	Berat Al (g)	% ICE reduksi Al
Tanpa Membran - 1 cm	75%	1,855	28%
Tanpa Membran - 0,7 cm	73%	1,606	24%
Tanpa Membran - 0,2 cm	53%	1,346	29%
CEM - 1 cm	17%	0,522	35%
CEM- 0,7 cm	20%	0,629	36%

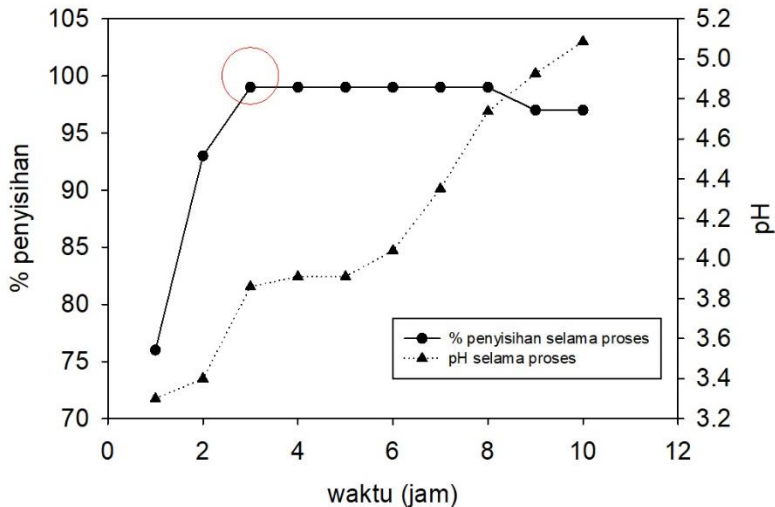
Variasi	% <i>recovery</i> Al	Berat Al (g)	% ICE reduksi Al
CEM - 0,2 cm	23%	0,730	36%
AEM - 1 cm	76%	2,886	43%
AEM - 0,7 cm	74%	2,521	39%
AEM - 0,2 cm	72%	2,264	34%

Berdasarkan **Tabel 4.3**, diketahui bahwa konfigurasi dengan membran AEM dan jarak elektroda 1 cm menghasilkan persentase *recovery* terbaik. Konfigurasi membran AEM- 1 cm juga mendapati penggunaan energi terbaik untuk *recovery* Al.

4.8 Penentuan Waktu Pengendapan

Proses elektrolisis untuk *recovery* aluminium membutuhkan waktu tertentu untuk melakukan reduksi. Waktu optimum yang diperlukan untuk proses elektrolisis dapat diketahui dengan menghitung besar penyisihan aluminium selama proses berlangsung. Keberhasilan proses reduksi aluminium dapat diketahui dengan pendekatan kandungan aluminium yang ada di kompartemen katoda. Hasil fluktuasi penyisihan aluminium selama proses elektrolisis dapat dilihat pada **Gambar 4.31**.

Pada **Gambar 4.31** diketahui bahwa pada jam ke-3 operasi elektrolisis terdapat penurunan untuk penyisihan aluminium sebesar 2%. Ion aluminium merupakan ion kompleks, dimana keberadaannya bergantung pH (Bahena *et al.*, 2002). Adanya perubahan nilai tegangan listrik selama proses elektrolisis berpengaruh pada banyaknya OH⁻ yang terbentuk dan mempengaruhi perubahan nilai pH. Dari **Gambar 4.28** dapat disimpulkan bahwa waktu operasi optimum untuk *recovery* aluminium adalah 2 jam.



Gambar 4. 31 Waktus Pengendapan Aluminium

4.9 Aplikasi *Recovery* Aluminium

Perencanaan untuk *scale up* dari basis data penelitian ke basis data lapangan memerlukan pengolahan data volume lumpur. Pengolahan data dilakukan dengan cara melakukan perhitungan berat lumpur terhadap data sekunder yang telah diperoleh. Banyaknya lumpur yang dihasilkan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Cornwell dan Westeroff, 1981). Data sekunder yang digunakan merupakan informasi yang diperoleh dari bagian produksi air baku PDAM X pada tahun 2018. Data yang digunakan adalah kuantitas, kekeruhan air baku yang digunakan, serta dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ yang digunakan. Kuantitas air baku yang diolah PDAM X adalah 2.500 L/dt. Sementara itu rata rata kekeruhan dan dosis koagulan adalah 80 NTU dan 40 mg/L.

$$W = 8,34 \times Q \times (0,8\text{Al} + \text{SS} + \text{A}) \quad \dots\dots\dots(4.20)$$

$$\text{SS} = b \times \text{TU} \quad \dots\dots\dots(4.21)$$

$$W = 8,34 \times Q \times ((0,8 \times \text{Al}) + (b \times \text{TU}))$$

$$W = 8,34 \times 57,06 \times ((0,8 \times 40) + (1,3 \times 80))$$

$$W = 22.463,25 \text{ kg/hari}$$

Dimana:

W = berat lumpur (lb/day)

Q = debit instalasi (mgd)

- Al = dosis Alumunium (mg/L)
 SS = suspended solid air baku (mg/L)
 b = rasio suspended solid terhadap kekeruhan, dengan range 0,7-2,2 (Cornwell dan Westeroff, 1981). Kawamura (2000) menggunakan angka sebesar 1,3.
 TU = kekeruhan air baku (NTU)
 A = koagulan lain yang ditambahkan (mg/L)

Volume lumpur bergantung pada kandungan air serta karakteristik padatan yang ada di dalamnya. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi perhitungan volume lumpur adalah sebagai berikut:

- Specific gravity Lumpur (Ssl)
 Nilai Ssl pada setiap unit proses serta operasi pengolahan yang digunakan berbeda. Tchobanoglous *et al.* (2013) menjelaskan bahwa lumpur yang berasal dari proses sedimentasi memiliki nilai Ssl sebesar 1,02.
- Persen Padatan Solid
 Qasim dan Syed (2000) menjelaskan bahwa persen padatan solid yang berasal dari proses *primary treatment* sebesar 1-7%. Sementara hasil karakterisasi lumpur diketahui persen padatan adalah 0,92%.

Selanjutnya dilakukan perhitungan volume lumpur dengan persamaan berikut ini (Tchobanoglous *et al.*, 2013):

$$Q_{sludge} = \frac{W}{\rho_w \times Ssl \times Ps} \dots\dots\dots(4.22)$$

$$Q_{sludge} = \frac{22.463,25}{997 \times 1,02 \times 0.92}$$

$$Q_{sludge} = 24 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Dimana:

Qsludge= jumlah kuantitas lumpur (m³/hari)

W = berat lumpur (kg/hari)

ρ_w = berat jenis air (kg/m³)

Ssl = specific gravity lumpur

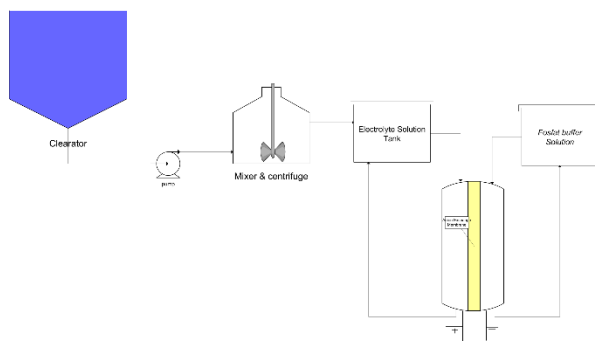
Ps = persen padatan solid kering dalam desimal

Berdasarkan persamaan 4.20 dan 4.22 untuk perhitungan Q sludge diketahui seperti pada **Tabel 4.4.**

Tabel 4. 4 Berat dan Volume Lumpur PDAM X

Berat lumpur	22463,25 kg/hari
Q sludge	24 m ³ /hari

Proses *scale up* membutuhkan perencanaan proses elektrolisis dimulai dari proses pengambilan lumpur pada unit clearator dan dilanjutkan pada proses pemberian asam sulfat dan sentrifugasi. Setelah didapat filtrat elektrolit kemudian dilakukan elektrodialisis dengan *Anion Exchange Membrane*. Diagram alir proses pengolahan lumpur PDAM X dapat dilihat pada **Gambar 4.32**.



Gambar 4. 32 Skema Skala *Pilot*

Berdasarkan penelitian ini, diketahui bahwa sebelum proses aplikasi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dalam skala *pilot* yang kemudian dievaluasi kembali dengan membandingkan hasil dari penelitian skala laboratorium (Ward *et al.*, 2018). Selain itu, untuk debit lumpur sebesar 24m³/hari, dibutuhkan reaktor yang lebih besar. Penelitian lebih lanjut diperlukan guna menentukan skenario pengolahan dengan elektrokimia. Mekanisme elektrokimia telah berhasil dilakukan. Gambar reaktor pada skala *pilot* dapat dilihat pada **Gambar 4.33**.



Gambar 4. 33 Contoh Alat Elektrodialisis
Sumber : (Ward *et al.*, 2018)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- (1.) Hasil dari karakteristik lumpur adalah: kadar air $99,08 \pm 0,0056 \%$, *Sludge Volume Index* $114,18 \pm 1,97 \text{ mL.g}^{-1}$, *Volatile Solid* $1.733 \pm 4,05 \text{ mg.L}^{-1}$, *Total Dissolved Solids* (TDS) $352,7 \pm 1,54 \text{ mg.L}^{-1}$, pH $7,46 \pm 0,0047$, alkalinitas $70,8 \pm 7,21 \text{ mg.L HCO}_3^-$, COD $9.666,6 \pm 11,54 \text{ mg.L}^{-1}$, BOD₅ $1.443,5 \pm 17,33 \text{ mg.L}^{-1}$, Logam Al $126.100 \text{ mg.L}^{-1}$, Logam Fe 55.400 mg.L^{-1} , Logam Cu 59 mg.L^{-1} , dan Logam Cr 23 mg.L^{-1}
- (2.) Penggunaan membran AEM dapat mengoptimalkan proses elektrolisis dibuktikan pada penelitian ini. Besarnya nilai ICE untuk reduksi dengan konfigurasi ini menghasilkan nilai yang paling besar yaitu, 46%.
- (3.) Jarak elektroda 1 cm pada penelitian ini terbukti sebagai jarak elektroda optimum untuk elektrolisis karena berhubungan dengan nilai potensial reduksi serta dapat *merecover* aluminium sebesar 76%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah :

- (1.) Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai waktu operasi yang optimum dengan mekanisme kontinyu.
- (2.) Perlu adanya kontrol terhadap pH selama operasi proses elektrolisis. Dikarenakan pH yang terlalu tinggi menyebabkan tidak terbentuknya presipitat.
- (3.) Pemilihan kuat arus optimum ditentukan dengan mempertimbangkan nilai ICE untuk reduksi Al

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abou-Shady, A., C. Peng, J. Bi, H. Xu, J. Almeria . (2012). Recovery of Pb (II) and removal of NO₃ – From Aqueous Solutions Using Integrated Electrodialysis, Electrolysis, And Adsorption Process. *Desalination*, 304–315.
- Ahmad, H., 1992. *Elektrokimia dan Kinetika Kimia*. Bandung: PT.Citra Aditya Bakti.
- Alphanoda, A.F. (2016). Pengaruh Jarak Anoda-Katoda dan Durasi Pelapisan Terhadap Laju Korosi pada Hasil Electroplating Hard Chrome. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, 1, 1–6.
- Amrulloh, F., A.E. Palupi. (2014). Pengaruh Tegangan Listrik dan Jarak Elektroda Proses Pelapisan Nikel Krom Terhadap Karakteristik Baja ST 42. *Jurnal Teknik Mesin*, 2, 122–128.
- Anglada, A., A. Urtiaga, I. Ortiz. (2009). Contributions of Electrochemical Oxidation to Waste-water Treatment: Fundamentals and Review of Applications. *Social Chemical Industry*, 84, 1747–1755.
- Aoudja, S., A. Khelifa, N. Drouiche, M. Hecini, H. Hamitouche. (2010). Electrocoagulation Process Applied to Wastewater Containing Dyes from Textile Industry. *Chemical Engineering Process*, 49, 1176–1182.
- APHA, AWWA, WPFC, 2012. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22nd ed*. Washington DC.
- ASM International. 1990. ASM Handbook, Properties and Selection Nonferrous and Special-Purpose Material. Metal Park Ohio: ASM International.
- Asyari, N. (2012) . Pemurnian Perak dengan Metode Elektrolisis. Laporan Tugas Akhir Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.
- Atekwanaa, E.A., D.D. Werkema Jr, E.A. Atekwanaa, R.S. Roweb, F.D. Legal. (2004). The Relationship of Total Dissolved Solids Measurements to Bulk Electrical Conductivity in An Aquifer Contaminated with Hydrocarbon. *Journal Applied Geophysics*, 56, 281– 294.
- Babatunde, A.O., Y. Q. Zhao. (2007). Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An

- International Review of Beneficial Reuses. *Environmental Science Technology*, 37(2), 129–164.
- Babatunde, A.O., Y.Q. Zhao, A.M. Burke, M.A. Morris, J.P. Hanrahan. (2009). Characterization of Aluminium-Based Water Treatment Residual for Potential Phosphorus Removal in Engineered Wetlands. *Environment Pollution*, 157, 2830–2836.
- Bahena, J.L.R., A.R.Cabrera, A.L.Valdivieso, R.H.Urbina. (2002). Fluoride Adsorption Onto α -Al₂O₃ and Its Effect on The Zeta Potential at The Alumina– Aqueous Electrolyte Interface. *Science Technology*, 37, 1973–1987.
- Bard, A.J., L.R.Faulkner. 2001. *Electrochemical methods: fundamental and application*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Brewster, E.T., A.J. Ward, C.M. Mehta, J.Radjenovic, D.J. Batstone. (2016). Predicting Scale Formation During Electrodialytic Nutrient Recovery. *Water Research*, 92, 1–35.
- Bye, C.M., P.L. Oold. (1998). Sludge Volume Index Settleability Measures: Effect of Solids Characteristics and Test Parameters. *Water Environment Res*, 70, 87–93.
- Chang, R., 2005. *Kimia Dasar Konsep-konsep Inti Edisi Ketiga Jilid 2*. Jakarta : Erlangga.
- Chen, X., G.Chen, P.L.Yue. (2002). Investigation on The Electrolysis Voltage of Electrocoagulation. *Chemical Engineering Science*, 57, 2449 – 2455.
- Chen, X., G.Chen, P.L.Yue. (2000). Separation of Pollutants From Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Sep. Purification Technologies*, 19, 65–76.
- Choi, J.-H., H.Lee, S.Moon. (2001). Effects of Electrolytes on the Transport Phenomena in a Cation-Exchange Membrane. *Journal Colloid Interface Science*, 238, 188–195.
- Christensen, I.V., A.J.Pedersen, L.M.Ottosen, A.Ribeiro. (2005). Electrodialytic Remediation Of Cca-Treated Wood In Larger Scale. *Environment Green Chemical Pollution Ecosystem*, 1, 784–788.
- Cornwell, D.A., G.P.Westerhoff. 1981. *Management of Water Treatment Plant Sludge, Sludges and Its Ultimate Disposal*. Michigan : Ann Arbor Scientific Publication.

- Cui, L., Guangpei L., Yuzhong L., Bo Y., Liqiang Z., Yong D., dan Chunyuan M. (2017). Electrolysis-Electrodialysis Process for Removing Chloride Ion in Wet Flue Gas Desulfurization Wastewater (DW): Influencing Factors and Energy Consumption Analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 123, 240–247.
- Cundari, L., E.Supriyatna, H.Samhudi. (2016). Pengaruh Waktu Kontak dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Recovery Aluminium pada Asidifikasi Sludge Keluaran Water Treatment. *Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya*, 22, 19–27.
- Dassanayake, K.B., G.Y. Jayasinghe, C.Hetherington, A. Surapaneni, C.Hetherington. (2015). A Review on Alum Sludge Reuse with Special Reference to Agricultural Applications and Future Challenges. *Melbourne Science Land Environmental Universitas Melbourne*, 38, 321–335.
- Dayton, E.A., N.T. Basta. (2001). Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute. *Water Environment Research*, 73, 52–57.
- Diaz, C.B., V. V.Guerrero, N.G.Rivas, F.U.Nunez. (2014). Double Aluminum Recovery and Its Reuse in Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 2979–2986.
- Elicker, C., K.R.L.Castagno, P.J.S.Filho.(2014).Electroremediation Of Heavy Metals In Sewage Sludge. *Journal Chemical Engineering*, 31, 365–371.
- Ewida, K.T., M.S.E.Abdo, Y.M.Youssef. (2008). Recovery of alum From Wasted Sludge Produced From Water Treatment Plants, 28, 1205–1216.
- Fitri, H. (2013). Dampak Pembuangan Lumpur Perusahaan Daerah Air Minum Kota Pontianak Terhadap Kualitas Air Sungai Kapuas. *Jurnal Mahasiswwa Teknik Lingkungan UNTAN*,1.
- Fitri, N.T.D. (2013). Penentuan Kadar Ion Aluminium Hasil Ekstraksi Dari Abu Terbang (Fly Ash Batubara. *Jurusan Kimia Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember*.
- Ghangrekar, M.M., V.B. Shinde. (2007). Performance of Membrane-Less Microbial Fuel Cell Treating Wastewater

- And Effect of Electrode Distance and Area on Electricity Production. *Bioresource Technology*, 98, 2879–2885.
- Guyton, A.C., Hall J.E. 1996. *Textbook of Medical Physiology*. Philadelphia: W.B.Saunders Company.
- Hadi, A. 2005. *Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Hallock, R.J., L.L. Hallock. 1993. *Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: A Review of Literature and Recommendation for Salmonid Species*. USA: Water Resource Investigation Repository.
- Hernández, F.E., A.Marcano, Y.Alvarado, A. Biondi, H. Maillotte. (1998). Measurement of Nonlinear Refraction Index and Two-Photon Absorption in A Novel Organometallic Compound. *Optic Community*, 152, 77–82.
- Hovsepyan, A. dan J.J. Bonzongo. (2009). Aluminum Drinking Water Treatment Residuals (Al-Wtrs) as Sorbent for Mercury: Implications for Soil Remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 164 (1), 73-80.
- Huang, C., T.Xu, Y.Zhang, Y.Xue, G.Chen. (2007). Application of electrodialysis to the production of organic acids: State-of-the-art and recent developments. *Function Membrane School Chemical Material Science University Science Technology*, 288, 1–12.
- Hwang, G.-J., H. Ohya. (1996). Preparation Of Cation Exchange Membrane As A Separator For The All-Vanadium Redox Flow Battery. *Journal Membrane Science*, 120, 55–67.
- Ippolito, J.A., Barbarick H. A., dan Elliott. (2011). Drinking Water Treatment Residuals: A Review of Recent Uses. *Journal Environment Quality*, 40 (1), 1-12.
- Irfan. 2007. *Recovery Alum dari Lumpur Accelator Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Gunung Pangilun Padang*. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas.
- Jime´nez, B., M. Marti´nez, M. Vaca. (2007). Alum Recovery and Wastewater Sludge Stabilization with Sulfuric Acid. *IWA Publication*, 56, 133–141.
- Kawamura, S. 2000. *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Kisnawati, R.D., dan Suprpto. (2016). Pemisahan Alumina pada Residu Bauksit (Red Mud) yang Berasal dari Riau dengan Metode Sintering Sodalime. *Jurnal Kimia Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 5 (2), 2337–3520.
- Kumagai, I., K.Tomano, Y.Kinoshita. (1987). Cation Exchange Membrane. *Patent No 4,663,013*.
- Lewis, T. E., 1990. *Environmental Chemistry and Toxicity of Aluminium*. Michigan: Lewis Publisher.
- Liani, P.H., W.Simanjuntak, S.Sembiring. (2004). Preparasi Alumina Dengan Metode Elektrokimia Sebagai Bahan Baku Pembuatan Zeolit Sintetik dan Karakterisasinya Dengan Transmission Electron Microscopy (TEM). *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 2 (2), 131-137.
- Liu, H., J.Qu, X.Zhao. (2010). Electrocoagulation in Water Treatment. *Electrochemical Environmental*, 1, 245–262.
- MacCrehan, W.A., R.A. Durst, J.M. Bellama. 1977. Electrochemical Detection In Liquid Chromatography: Application To Organometallic Speciation. *Analytical Letters*, 10, 1175–1188.
- Merle, G., K.Nijmeijer, M.Wessling. (2011). Anion Exchange Membranes for Alkaline Fuel Cells. *Journal Membrane Science* 1–35.
- Mirwan, A., W.A.Prasetyo, R.F.Sari. (2017). Alumina Recovery From Solid Waste Sludge (SWS) PDAM Intan Banjar. *Konversi*, 6, 13–19.
- Mizwar, A., S.R. Amalia. 2012. Pemanfaatan Limbah Lumpur Pengolahan Air Sebagai Bahan Pembuatan Batu Bata. *Jurnal Bumi Lestari*, 12, 390–395.
- Modirshahla, N., M.A. Behnajady, S.M.Aghdam. (2008). Investigation Of The Effect Of Different Electrodes And Their Connections On The Removal Efficiency Of 4-Nitrophenol From Aqueous Solution By Electrocoagulation. *Journal Hazardous Materials*, 154, 778–786.
- Nair, A.T., M.M.Ahammed. (2014). Coagulant Recovery From Water Treatment Plant Sludge And Reuse In Post-Treatment Of UASB Reactor Effluent Treating Municipal Wastewater. *Environmental Science Pollution Research*, 21, 10407–10418.

- Nurajijah, L., D.Harjunowibowo, Y.Radiyono. (2014). Pengaruh Variasi Tegangan pada Pengolahan Limbah Cair Laundry Menggunakan Proses Elektrolisis. *Jurnal Materi Dan Pembelajaran Fisika*, 4, 31–38.
- Nurcahyo, W., I.Sumantri, L.Kurnisari. (2014). Pembuatan Aluminium Sulfat Dari Clay. *Jurnal Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro*, 10, 29–33.
- Onorato, C., L.J. Banasiak, A.I. Schäfer. (2017). Inorganic Trace Contaminant Removal From Real Brackish Groundwater Using Electrodialysis. *Separation Purification Technology*, 187, 426-435.
- Panniza, M., P.A. Micchaud, G Cerisola, Ch Comenallis. (2001). Electrochemical Treatment of Wastewaters Containing Organic Pollutants on BDD Electrodes: Prediction of Spesific Energy Consumption and Required Electrode Area . *Electrochemistry Communications*, 3, 336–339.
- Paunovic, M. 2007. Encyclopedia of Electrochemmistry, in: *Electrochemical Deposition*. pp. 87–158.
- Polcaro, A.M., M. Mascia, S. Palmas, A. Vacca. (2010). Case Studies in the Electrochemical Treatment of Wastewater Containing Organic Pollutants Using BDD. *Electrochemistry Environmental* , 1, 205–213.
- Prakash, P., David, Hoskins, A.K. SenGupta. (2004). Application of Homogeneous And Heterogeneous Cation-Exchange Membranes In Coagulant Recovery From Water Treatment Plant Residuals Using Donnan Membrane Process. *Journal Membrane Science* ,237, 131–144.
- Qasim, R.Syed. 2000. *Wastewater Treatment Plant, Planning, Design and Operational*. New York : College Publishing.
- Rahman, F. (2017). Perbandingan Metode Grinding Dan Slurry Terhadap Karakteristik Air Produksi Pdam Kota Surabaya. *Thesis Thesis Universitas Airlangga*.
- Rahmawati, Z.S. (2010). Analisis Pengaruh Sr dan Ti Terhadap Ketahanan Korosi Paduan AC4B. *Prosiding Seminar Material dan Metalurgi*, 3, 501-512.
- Razif, M. 2003. *Application of Cleaner Production in Drinking Water Treatment Plant (Case study of PDAM Surabaya)*.
- Rifa'i, J. 2007. *Pemeriksaan Kualitas Air Bersih dengan Koagulan Alum dan PAC di IPA Jurug PDAM Kota Surakarta*.

- Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Riyanto, 2013. *Elektrokimia dan aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Roberts, M., Charles P. Roddy. (1960). Recovery and Reuse of Alum Sludge at Tampa. *J. Distribution Syst. Am. Water Works Assoc.*, 52, 857–866.
- Rozendal, R.A., H.V.M. Hamelersa, R.J. Molenkampb, C.J.N. Buisman. (2007). Performance Of Single Chamber Biocatalyzed Electrolysis With Different Types Of Ion Exchange Membranes. *Water Research*, 41, 1984 – 1994.
- Rozendal, R.A., T. H. J. A. Sleutels, H. V. M. Hamelers, C. J. N. Buisman. (2008). Effect Of Ion Exchange Membrane On Biocatalyzed Electrolysis Of Wastewater. *Water Science Technologies*, 57, 1757–1762.
- Saputra, E., F.Hanum. (2016). Pengaruh Jarak Antara Elektroda Pada Reaktor Elektrokoagulasi Terhadap Pengolahan Effluent Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 5, 33–40.
- Sarwono, J. 2006. *Metode Penelitian Kuantitatif & Kualitatif*. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Sawyer, C.N., Perry L. McCarty, Gene F. Parkin. 2003. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. McGraw-Hill Education.
- Scanell, W., Duffy, L.K. Duffy (2007). Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms. *Am. Journal Environment Science*, 3, 1–6.
- Sengupta, A.K. 2002. *Process for Selective Coagulant Recovery from Water Treatment Plant Sludge*. Pat. No US 6945047 B1.
- Sengupta, A.K., Y.Marcus, J.A. Marinsk. (2002). Ion Exchange and Solvent Extraction. *A Series of Advances*, 17 (6), 1-20.
- Serikawa, R.M. (2010). Wet Electrolytic Oxidation of Organics and Application for Sludge Treatment. *Electrochemistry Environmental*, 1, 353–370.
- Setiawan, H. 2013. Elektrokimia, in: *Kimia Fisika*. ITS Press, Surabaya.

- Shi, B., A.K.Sengupta. (1992). Selective Alum Recovery from Clarifier Sludge. *Journal America Water Works Association*. 9, 96–103.
- Šljukić, B., A.L. Morais, C. A. C. Sequeira, D.M. F. Santos. (2012). Anion- or Cation-Exchange Membranes for $\text{NaBH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ Fuel Cells. *Membranes*, 2, 478–492.
- Songa, C., C.J.Chua, Y.Tanga, J.L.Zhanga, J.Lib, J.Zhanga, K.Wang, S.McDermidb, P.Kozakb. Voltage Jump During Polarization of a PEM Fuel Cell Operated At Low Relative Humidities. *Int. Journal Hydrogen Energy*, 33, 2008.
- Sopiah, S. 2008. *Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrolisis Larutan CuSO_4 sebagai Bahan Kajian dalam Pembuatan dan Pembelajaran Elektronik*. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Suherman dan F.S. Budi 2005. *Recovery Alumina dari Lumpur Alum Limbah PDAM menjadi Tawas Cair*. Laporan Kegiatan Penelitian Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Suseno, H. 1997. Dekontaminasi Redoks : Pengaruh Tegangan Lebih Permukaan Elektroda Terhadap Sistem Regenerasi Ce_3 Secara elektrolitik. *Hasil Penelitian Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif*, 1, 133–137.
- Sutrisna, P.D. (2002). Bipolar Membrane Electrodialysis : Teknologi Atraktif untuk Produksi Asam dan Basa. *Unitas Universitas Surabaya*, 10 (2), 33-44.
- Syukri, S. 1999. *Kimia Dasar*. Institut Teknologi Press, Bandung.
- Tchobanoglous, G., H.D.Stensel, R.Tsuchihashi, F.Burton, 2013. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery: Treatment and Resource Recovery, 5th ed.* Europe : McGraw-Hill Education.
- Tim Analisa dan Evaluasi Komoditi Mineral Internasional Proyek Pengembangan Pusat Informasi Mineral. 1984. *Pengkajian Bauksit, Alumina, Alumunium (Study of Bauxite-Alumina-Alumunium)*.
- Topayung, D. (2011). Pengaruh Arus Listrik dan Waktu Proses Terhadap Ketebalan dan Massa Lapisan yang Terbentuk pada Proses Elektroplating Pelat Baja. *Jurnal Ilmu Sains*, 11, 97–101.

- Trihadiningrum, Y. 2016. Pengolahan Limbah, in: *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun*. Teknosain, Yogyakarta.
- US EPA . 1992 . *Environmental Protection Agency* . United States.
- Valero, F., A.Barceló, R. Arbós. (2011). Electrodialysis Technology, Theory and Applications. *Desalination Trends Technology*, 1 (14), 3–17.
- Varcoe, J.R., P.Atanassov, D. R. Dekel, A. M. Herring, K. Nijmeijer, K. Scott, T. Xu, L. Zhuang. (2014). Anion-exchange Membranes in Electrochemical Energy Sytems. *Energy Environment Science*, 7, 3135-3191.
- Verma, S.K., V. Khandegar, A. K. Saroha. (2013). Removal of Chromium from Electroplating Industry Effluent Using Electrocoagulation. *Journal Hazardous Toxic Radioactive Waste*, 17, 146–152.
- Ward, A.J., D.J. Batstone, K. Arola, E.T.Brewster, C.M. Mehta, (2018). Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis. *Water Research*, 135, 57–65.
- Wenten, I.G., A.N. Hakim, Khoiruddin, P.T.P. Aryanti. 2013. *Polarisasi Konsentrasi Dan Fouling Pada Membran*, Lecturer Note. ITB Press, Bandung.
- Widayatno, T., L.T. Gupita, P.Novitasari, S. Imaswati. (2016). Recovery Logam Perak dari Limbah Cair Bekas Pencucian Foto Rontgen: Karakterisasi Elektrokimia. *Symposium Nasional RAPI XV UMS*.
- Widodo, G., Sigit, R. Langenati, Torowati, N. Yudhi. (2010). Pengaruh Tegangan, Waktu, dan Keasaman pada Proses Elektrodialisis Larutan Uranil Nitrat. Pus. Teknol. Bahan Bakar Nukl. – *Batan 6* No. 1, 1–69.
- Xu, G.R., Z.C.Yan, Y.C.Wang, N.Wang. (2009) . Recycle Of Alum Recovered From Water Treatment Sludge in Chemically Enhanced Primary Treatment. *Journal of Hazardous Material*, 161, 663–669.
- Yulianto, A., L. Hakim, I. Purwaningsih, dan V.A. Pravitasari. (2009). Pengolahan Limbah Cair Industri Batik Pada Skala Laboratorium Dengan Menggunakan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 5 (1), 6-11.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

1. Analisis Kadar Air

Alat dan Bahan :

1. Sampling lumpur alum hasil *dewatering* PDAM X
2. Cawan porselain

Prosedur Analisis

1. Cawan porselain dimasukkan dalam oven suhu 105°C selama 1 jam
2. Cawan porselain dimasukkan dalam desikator selama 15 menit
3. Sampling lumpur alum dimasukkan dalam cawan porselain dan ditimbang dngan neraca analitis (A)
4. Sampling lumpur alum dimasukkan dalam cawan porselain dan dioven selama 24 jam
5. Lumpur kering didesikator selama 15 menit
6. Lumpur alum dan cawan ditimbang dengan neraca analitis (B)
7. Perhitungan % kadar air dengan rumus :
$$\frac{A-B}{A} \times 100\%$$
8. Lumpur alum disimpan

2. Chemical Oxygen Demand

Alat dan Bahan :

1. Labu Erlenmeyer 250 mL 2 buah
2. Tabung COD
3. Rak COD
4. Pipet 5 mL dan 10 mL
5. Pipet tetes 1 buah
6. *Beaker glass* 50 mL 1 buah
7. Gelas ukur 25 mL 1 buah
8. Kompor listrik
9. Larutan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,2 N
10. Kristal perak sulfat (Ag_2SO_4) dicampur dengan asam sulfat (H_2SO_4)
11. Larutan standart Fero Amonium Sulfat (FAS) 0,1 N

12. Larutan indikator Fenantrolin Fero Sulfat (Feroin)

Prosedur Analisis :

1. Menambahkan 1,5 mL Larutan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,2 N
2. Menambahkan 3,5 mL Larutan Ag_2SO_4
3. Memasukkan sampel ke dalam tabung 2 COD masing-masing sebanyak 1 mL, dimana 1 tabung sebagai blanko.
4. Menyalakan kompor listrik dan meletakkan tabung COD pada rak COD, kemudian meletakkan rak COD tersebut di atas kompor listrik. Memanaskan selama 2 jam.
5. Setelah 2 jam, kompor listrik dimatikan dan tabung COD dibiarkan hingga dingin.
6. Memindahkan sampel yang berada pada tabung COD ke dalam labu erlenmeyer 100 mL kemudian
7. Menambahkan indikator feroin sebanyak 4 tetes.
8. melakukan titrasi menggunakan standart FAS 0,1 N hingga warna biru-hijau berubah menjadi merah- coklat permanen.
9. Hitung kadar *volatile solids* dengan persamaan :

$$COD \frac{mg}{L} = \frac{(A-B) \times n \times 8000}{Volume\ sampel} \times Fp$$

Keterangan :

A = mL FAS titrasi blanko

B = mL FAS titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

P = pengenceran

3. Analisis *Volatiled Solids*

Alat dan Bahan :

1. Lumpur alum yang telah dikeringkan
2. Cawan porselain

Prosedur Analisis

1. Lumpur alum yang telah dikeringkan dimasukkan ke dalam furnace suhu $550^\circ C$ selama 1 jam
2. Residu dan cawan porselain dioven suhu $105^\circ C$ selama 15 menit
3. Residu dan cawan porselain didesikator selama 15 menit
4. Timbang dengan neraca analitis (C)
5. Hitung kadar *volatile solids* dengan persamaan :

$$\frac{B-C}{C} \times 100\%$$

4. Analisis Konduktivitas

Alat dan Bahan :

1. Lumpur alum kering
2. aquadest
3. *conductivity* meter
4. Larutan KCl

Prosedur Analisis

1. Lumpur alum kering dicampur dengan aquadest secukupnya
2. Diaduk dengan *magnetic stirer* selama 5 menit
3. Kalibrasi antara *conductivity* meter dengan larutan KCl
4. *Probe conductivity* meter dicelupkan kedalam sampel
5. pembacaan nilai konduktivitas secara digital

5. Pengukuran pH

Alat dan Bahan :

1. Lumpur alum kering
2. aquadest
3. pH meter

Prosedur Analisis

1. Lumpur alum kering dicampur dengan aquadest secukupnya
2. Diaduk dengan *magnetic stirer* selama 5 menit
3. pH meter dibersihkan dengan aquadest dan dikeringkan dengan tissue
4. pH meter dicelupkan kedalam sampel
5. pembacaan angka pH secara digital

6. Biochemical Oxygen Demand (BOD)

Prosedur analisis :

Pembuatan Air Pengencer

Air pengencer ini tergantung banyaknya sampel yang akan dianalisis dan pengencerannya, prosedurnya:

- A. Menambahkan 1 mL larutan Buffer Fosfat per liter air.
- B. Menambahkan 1 mL larutan Magnesium Sulfat per liter air.

- C. Menambahkan 1 mL larutan Kalium Klorida per liter air.
- D. Menambahkan 1 mL larutan Feri Klorida per liter air.
- E. Menambahkan 10 mg bubuk inhibitor.
- F. Melakukan aerasi minimal selama 2 jam.
- G. Menambahkan 1 mL larutan benih per liter air.

Prosedur BOD

- A. Menentukan Pengenceran
Untuk menganalisis BOD harus diketahui besarnya pengenceran melalui angka $KMnO_4$ sebagai berikut:

$$P = \frac{\text{Angka } KMnO_4}{3 \text{ atau } 5}$$

- B. Prosedur BOD dengan winkler
 - Menyiapkan 1 buah labu takar 500 mL dan tuangkan sampel sesuai dengan
 - perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu.
 - Menyiapkan 2 buah botol winkler 300 mL dan 2 buah botol winkler 150 mL.
 - Menuangkan air dalam labu takar tadi ke dalam botol winkler 300 mL dan 150 mL sampai tumpah.
 - Menuangkan air pengencer ke botol winkler 300 mL dan 150 mL sebagai blanko sampai tumpah.
 - Memasukkan kedua botol winkler 300 mL ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari.
 - Kedua botol winkler 150 mL yang berisi air dianalisis oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut:
 - Menambahkan 1 mL larutan Mangan Sulfat
 - Menambahkan 1 mL larutan Pereaksi Oksigen
 - Menutup Botol dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udaranya lalu balik-balikkan beberapa kali.
 - Membiarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit.
 - Menambahkan 1 mL Asam Sulfat pekat, tutup dan balik-balikkan
 - Menuangkan 100 mL larutan ke dalam erlenmeyer 250 mL
 - Menambahkan 3-4 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Tiosulfat hingga warna biru hilang

- Setelah 5 hari, analisis kedua larutan dalam botol winkler 300 mL dengan analisis oksigen terlarut.
- Hitung Oksigen Terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned} \text{OT}(\text{mg O}_2/\text{L}) &= \frac{a \times N \times 8000}{100 \text{ mL}} \\ \text{BOD}^{20}_5 (\text{mg/L}) &= \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P} \\ &= \frac{\text{mL sampel}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}} \end{aligned}$$

Di mana:

X_0 = oksigen terlarut sampel pada $t = 0$

X_5 = oksigen terlarut sampel pada $t = 5$

B_0 = oksigen terlarut blanko pada $t = 0$

B_5 = oksigen terlarut blanko pada $t = 5$

P = derajat pengenceran

7. Analisis kadar Al, Pb, Cr, Cu

Alat dan Bahan :

1. Lumpur kering
2. Aquadest

Prosedur Analisis

1. Lumpur kering ditambahkan dengan aquadest 15 mL
2. Diaduk dengan *magnetic stirer* selama 15 menit
3. Pembacaan logam aluminium dan Pb, Cr, Cu dengan instrumen *ICP*

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B HASIL ANALISIS

1. Karakterisasi Lumpur

Lumpur alum PDAM X dianalisis berdasarkan komposisi fisik, kimiawi, organik dan kandungan logam secara *triplo* analisis, Hasil analisis lumpur PDAM X dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 1,1

Lampiran B Tabel 1, 1 Karakterisasi Lumpur

Parameter	Konsentrasi		standar deviasi		rata-rata				
	kering	basah	kering	basa h					
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	Lumpur Kering			Lumpur Basah	
Kadar Air		1,0		0,006				99,08 % ±	0,005 6
		1,0							
		1,0							
pH	7,79	7,5	0,069	0,005	7,87	±	0,0694	7,47 ±	0,004 7
	7,87	7,5							
	7,96	7,5							
Sludge Volume Index		100,8		16,1				114,1 8 ±	16,14 2
		136,9							
		104,9							
Alkalinitas	40760,87	62,5	6405,0	5,9	49819 ±	6405	±		

Parameter	Konsentrasi		standar deviasi		rata-rata		
	kering	basah	kering	basah			
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	Lumpur Kering	Lumpur Basah	
	54347,83	75,0				70,83	5,892
	54347,83	75,0				3	6
<i>Total Solids</i>		12330,0		263,3		1269	± 263,3
		12816,7				6	
		12940,0				5	
<i>Total Suspended Solids</i>		12300,0		235,7		1251	± 235,6
		12393,3				1	
		12840,0				6	
<i>Total Dissolved Solids</i>		346,4		12,6		352,7	± 12,61
		370,4				6	
		341,5				5	
<i>Total Volatiled Solids</i>		12330,0		263,3		1269	± 263,3
		12816,7				6	
		12940,0				5	
<i>Total Fixed Solids</i>		10623,3		251,9		1096	± 251,8
		11036,7				2	
		11226,7				7	

Parameter	Konsentrasi		standar deviasi		rata-rata					
	kering	basah	kering	basa h						
	mg/kg	mg/L	mg/kg	mg/L	Lumpur Kering		Lumpur Basah			
Biochemical Oxygen Demand	108608,7	1186,6	26192,4	106,1	83719	±	108609	1082,5	±	106,14
	95032,6	936,8								
	47516,3	1124,1								
Chemical Oxygen Demand	760869,6	11000,0	177499,3	942,8	760870	±	760870	9666,7	±	942,81
	978260,9	9000,0								
	543478,3	9000,0								
Kadar Al	126100 mg/L									
Kadar Fe	55400 mg/L									
Kadar Cr	23 mg/L									
Kadar Cu	59 mg/L									

a. Uji Polarisasi

Uji Polarisasi yang dilakukan dua kali dengan dua reaktor yang berbeda dengan *control* tegangan dinaikkan 0,3 Volt setiap 3 menit. Data pada reaktor I yaitu bekerja di tegangan 0-6 Volt dapat dilihat pada Tabel 1.2 sementara pada reaktor II dapat dilihat pada Tabel 1.3.

Lampiran B Tabel 1. 2 Uji Polarisasi 0-6 Volt

Voltase	Kuat arus (mA)	TDS (g/L)
0	0	5.28
0.2	0	
0.4	0	
0.6	0	
0.8	0	
1	0	
1.2	0	
1.4	0	
1.6	9	
1.8	15	4.54
2	24	
2.2	38	
2.4	47	
2.6	61	
2.8	77	3.61
3	79	
3.2	96	
3.4	105	
3.6	119	
3.8	136	3.5
4	167	
4.2	197	
4.4	236	
4.6	253	
4.8	277	3.24
5	300	

Voltase	Kuat arus (mA)	TDS (g/L)
5.2	318	
5.4	328	
5.6	330	
5.8	320	1.56

Lampiran B Tabel 1. 3 Uji Polarisasi 6-9 Volt

Voltase	Kuat arus (mA)	TDS (g/L)
6	454	2.54
6.2	491	
6.4	525	
6.6	573	
6.8	608	
7	618	
7.2	661	2.52
7.4	680	2.52
7.6	733	2.99
7.8	759	2.52
8	782	2.53
8.2	814	2.51
8.4	841	2.62
8.6	879	
8.8	908	2.41
9	933	
9.2	962	

2. Analisis *Total Dissolved Solids* (TDS) dan pH

Analisis TDS dan pH dilakukan secara *triplo* pada setiap jam operasional, Hasil analisis pada setiap jam operasi dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 2.1 hingga 2,15

Lampiran B Tabel 2. 1 Nilai TDS dan pH konfigurasi tanpa membran jarak 1 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	3,56	3,61	3,6	3,6	0,02	3,3	3,4	3,3	3,3	0,05	5,9
0,3	3,42	3,52	3,49	3,5	0,04	3,2	3,2	3,2	3,2	0,00	6
0,6	3,23	3,44	3,36	3,3	0,09	3,2	3,3	3,2	3,2	0,05	5,9
0,9	3,21	3,49	3,37	3,4	0,11	3,1	3,2	3,1	3,1	0,05	5,6
1,3	3,29	3,38	3,34	3,3	0,04	3	3,1	3,1	3,1	0,05	5,6
1,6	3,31	3,47	3,34	3,4	0,07	2,9	3	3	3,0	0,05	5,6
1,9	3,29	3,2	3,35	3,3	0,06	3	2,8	2,9	2,9	0,08	5,6
2,3	3,21	3,2	3,29	3,2	0,04	2,9	2,8	2,9	2,9	0,05	5,6
2,6	3,13	3,3	3,28	3,2	0,08	2,8	2,8	2,8	2,8	0,00	5,6
3,0	3,14	3,23	3,29	3,2	0,06	2,6	2,5	2,6	2,6	0,05	5,6
3,3	3,1	3,15	3,18	3,1	0,03	2,6	2,5	2,5	2,5	0,05	5,6

Lampiran B Tabel 2. 2 Nilai TDS dan pH konfigurasi tanpa membran jarak 0,7 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	3,46	3,45	3,46	3,5	0,00	3,1	3	3,1	3,1	0,05	5,1
0,3	3,32	3,3	3,31	3,3	0,01	3,1	3	3,1	3,1	0,05	5,1
0,6	3,3	3,31	3,3	3,3	0,00	2,9	3	3	3,0	0,05	5,1
0,9	3,3	3,31	3,3	3,3	0,00	2,8	2,8	2,8	2,8	0,00	5,1
1,3	3,1	3,14	3,1	3,1	0,02	2,8	2,8	2,8	2,8	0,00	5,1
1,6	2,9	2,89	2,89	2,9	0,00	2,7	2,7	2,7	2,7	0,00	5,1
1,9	2,86	2,87	2,86	2,9	0,00	2,7	2,7	2,7	2,7	0,00	5,1
2,3	2,31	2,4	2,39	2,4	0,04	2,6	2,6	2,6	2,6	0,00	5,1
2,6	2,21	2,2	2,22	2,2	0,01	2,6	2,6	2,6	2,6	0,00	5,1
3,0	2,22	2,21	2,2	2,2	0,01	2,5	2,5	2,5	2,5	0,00	5,1
3,3	2,11	2,12	2,14	2,1	0,01	2,4	2,4	2,4	2,4	0,00	5,1

Lampiran B Tabel 2. 3 Nilai TDS dan pH konfigurasi tanpa membran jarak 0,2 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	5,48	5,49	5,49	5,5	0,00	3	3,1	3	3,0	0,05	4,6
0,3	4,6	4,56	4,52	4,6	0,03	3	3	3	3,0	0,00	4,6
0,6	4,52	4,51	4,51	4,5	0,00	3	3	3	3,0	0,00	4,6
0,9	4,44	4,45	4,44	4,4	0,00	2,9	2,9	2,8	2,9	0,05	4,6
1,3	4,44	4,45	4,4	4,4	0,02	2,9	2,8	2,8	2,8	0,05	4,6
1,6	4,44	4,44	4,4	4,4	0,02	2,9	2,7	2,7	2,8	0,09	4,6
1,9	4,31	4,3	4,32	4,3	0,01	2,8	2,6	2,6	2,7	0,09	4,6
2,3	3,82	3,82	3,81	3,8	0,00	2,6	2,5	2,5	2,5	0,05	4,6
2,6	3,61	3,62	3,61	3,6	0,00	2,5	2,4	2,4	2,4	0,05	4,6
3,0	3,47	3,48	3,47	3,5	0,00	2,4	2,3	2,3	2,3	0,05	4,6
3,3	1,8	1,89	1,89	1,9	0,04	2,3	2,2	2,2	2,2	0,05	4,6

Lampiran B Tabel 2. 4 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran CEM jarak 1 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	2,35	2,3	2,34	2,3	0,02	3,5633	3,54	3,55	3,6	0,01	7,4
0,3	3,6	3,62	3,68	3,6	0,03	3,5767	3,56	3,58	3,6	0,01	7,9
0,6	3,4	3,48	3,51	3,5	0,05	4,1	4	4,2	4,1	0,08	7,9
0,9	3,49	3,31	3,53	3,4	0,10	4,3	4,31	4,34	4,3	0,02	8,1
1,2	3,31	3,41	3,28	3,3	0,06	8,7	8,69	8,71	8,7	0,01	9,3
1,6	4,06	4,18	3,89	4,0	0,12	9,6	9,61	9,59	9,6	0,01	10,3
1,9	4,11	4,21	4,02	4,1	0,08	9,73	9,74	9,74	9,7	0,00	14,4
2,2	4,19	4,32	4,03	4,2	0,12	10,01	10	9,99	10,0	0,01	16,3
2,6	4,27	4,43	4,12	4,3	0,13	10,5	10,51	10,49	10,5	0,01	16,4
2,9	4,49	4,67	4,38	4,5	0,12	11,13	11,12	11,13	11,1	0,00	16,8
3,3	4,88	4,91	4,98	4,9	0,04	11,67	11,66	11,67	11,7	0,00	17,3

Lampiran B Tabel 2. 5 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran CEM jarak 1 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	5,48	5,49	5,49	5,5	0,00	3	3,1	3	3,0	0,05
0,3	4,6	4,56	4,52	4,6	0,03	3	3	3	3,0	0,00
0,6	4,52	4,51	4,51	4,5	0,00	3	3	3	3,0	0,00
0,9	4,44	4,45	4,44	4,4	0,00	2,9	2,9	2,8	2,9	0,05
1,2	4,44	4,45	4,4	4,4	0,02	2,9	2,8	2,8	2,8	0,05
1,6	4,44	4,44	4,4	4,4	0,02	2,9	2,7	2,7	2,8	0,09
1,9	4,31	4,3	4,32	4,3	0,01	2,8	2,6	2,6	2,7	0,09
2,2	3,82	3,82	3,81	3,8	0,00	2,6	2,5	2,5	2,5	0,05
2,6	3,61	3,62	3,61	3,6	0,00	2,5	2,4	2,4	2,4	0,05
2,9	3,47	3,48	3,47	3,5	0,00	2,4	2,3	2,3	2,3	0,05
3,3	1,8	1,89	1,89	1,9	0,04	2,3	2,2	2,2	2,2	0,05

Lampiran B Tabel 2. 6 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran CEM jarak 0,7 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	2,82	2,81	2,84	2,8	0,01	3,91	3,9	3,91	3,9	0,00	10,3
0,3	2,88	2,87	2,87	2,9	0,00	3,9	3,91	3,93	3,9	0,01	10,3
0,6	2,96	2,97	2,96	3,0	0,00	4,02	4,09	3,98	4,0	0,05	10,4
0,9	3,07	3,03	3,07	3,1	0,02	4,52	4,34	4,67	4,5	0,13	10,8
1,2	3,15	3,14	3,15	3,1	0,00	8,87	8,9	8,73	8,8	0,07	10,3
1,6	3,28	3,27	3,21	3,3	0,03	9,54	9,29	9,68	9,5	0,16	14,4
1,9	3,35	3,37	3,35	3,4	0,01	9,93	9,84	9,98	9,9	0,06	14,9
2,2	3,38	3,36	3,31	3,4	0,03	10,67	10,59	10,71	10,7	0,05	14,8
2,6	5,01	5,02	5,01	5,0	0,00	10,76	10,67	10,86	10,8	0,08	14,4
2,9	5,25	5,24	5,25	5,2	0,00	10,81	10,94	10,69	10,8	0,10	14,7
3,3	5,46	5,44	5,43	5,4	0,01	11,1	11,15	11,09	11,1	0,03	14,3

Lampiran B Tabel 2. 7 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran CEM jarak 0,7 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	4,02	3,89	4,15	4,0	0,11	3,3	3,31	3,3	3,3	0,00
0,3	3,81	3,65	3,98	3,8	0,13	2,39	2,42	2,35	2,4	0,03
0,6	3,68	3,83	3,56	3,7	0,11	2,28	2,34	2,21	2,3	0,05
0,9	3,64	3,54	3,75	3,6	0,09	2,15	2,06	2,25	2,2	0,08
1,2	3,62	3,52	3,76	3,6	0,10	2,01	1,98	2,03	2,0	0,02
1,6	3,24	3,11	3,38	3,2	0,11	1,98	2,14	1,83	2,0	0,13
1,9	3,03	2,98	3,05	3,0	0,03	1,96	2,05	1,87	2,0	0,07
2,2	2,91	2,87	3,02	2,9	0,06	1,85	1,76	1,94	1,9	0,07
2,6	2,57	2,47	2,64	2,6	0,07	1,8	1,73	1,88	1,8	0,06
2,9	2,49	2,56	2,31	2,5	0,11	1,78	1,84	1,72	1,8	0,05
3,3	1,67	1,59	1,69	1,7	0,04	1,68	1,9	1,47	1,7	0,18

Lampiran B Tabel 2. 8 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran CEM jarak 0,2 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	2,6	2,62	2,58	2,6	0,02	3,76	3,74	3,72	3,7	0,02	10,4
0,3	2,65	2,67	2,66	2,7	0,01	3,84	3,85	3,86	3,9	0,01	10,3
0,6	2,74	2,74	2,72	2,7	0,01	4,03	4,03	4,05	4,0	0,01	10,4
0,9	2,79	2,78	2,72	2,8	0,03	4,44	4,43	4,42	4,4	0,01	10,4
1,2	2,78	2,78	2,79	2,8	0,00	4,91	4,93	4,9	4,9	0,01	10,4
1,6	2,82	2,85	2,87	2,8	0,02	6,61	6,62	6,62	6,6	0,00	10,4
1,9	3,19	3,17	3,15	3,2	0,02	8,85	8,86	8,86	8,9	0,00	10,3
2,2	3,19	3,2	3,2	3,2	0,00	9,28	9,24	9,28	9,3	0,02	10,4
2,6	3,19	3,2	3,21	3,2	0,01	10,12	10,13	10,17	10,1	0,02	10,4
2,9	3,8	3,9	3,8	3,8	0,05	10,61	10,62	10,61	10,6	0,00	10,4
3,3	4	4,1	4	4,0	0,05	10,98	10,99	10,98	11,0	0,00	10,4

Lampiran B Tabel 2. 9 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran CEM jarak 0,2 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	4,48	4,5	4,49	4,5	0,01	3,33	3,3	3,37	3,3	0,03
0,3	4,03	4	4,02	4,0	0,01	2,75	2,78	2,77	2,8	0,01
0,6	3,81	3,8	3,81	3,8	0,00	2,32	2,28	2,3	2,3	0,02
0,9	3,68	3,67	3,67	3,7	0,00	2,16	2,15	2,15	2,2	0,00
1,2	3,59	3,54	3,57	3,6	0,02	2,01	2,01	1,99	2,0	0,01
1,6	2,84	2,85	2,84	2,8	0,00	1,98	1,98	1,99	2,0	0,00
1,9	2,68	2,67	2,68	2,7	0,00	1,92	1,92	1,93	1,9	0,00
2,2	2,63	2,62	2,62	2,6	0,00	1,88	1,89	1,86	1,9	0,01
2,6	2,51	2,52	2,52	2,5	0,00	1,87	1,85	1,84	1,9	0,01
2,9	1,9	1,91	1,91	1,9	0,00	1,72	1,7	1,72	1,7	0,01
3,3	0,55	0,56	0,56	0,6	0,00	1,6	1,68	1,65	1,6	0,03

Lampiran B Tabel 2. 10 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran AEM jarak 1 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	3,9	3,95	3,92	3,9	0,02	3,0	3,0	3,0	3,0	0,08	10,4
0,3	3,24	3,28	3,26	3,3	0,02	3,2	3,3	3,1	3,2	0,08	10,7
0,6	2,8	2,76	2,78	2,8	0,02	3,6	3,4	3,5	3,5	0,08	10,9
0,9	2,6	2,31	2,46	2,5	0,12	3,6	3,6	3,6	3,6	0,00	11,1
1,2	2,5	2,32	2,45	2,4	0,08	3,6	3,6	3,6	3,6	0,00	11,4
1,6	1,82	2,1	1,96	2,0	0,11	3,7	3,7	3,7	3,7	0,00	11,6
1,9	1,76	1,91	1,81	1,8	0,06	3,7	3,7	3,7	3,7	0,00	11,9
2,2	1,42	1,89	1,66	1,7	0,19	3,7	3,7	3,7	3,7	0,00	12,3
2,6	1,9	1,23	1,57	1,6	0,27	3,7	3,7	3,7	3,7	0,00	12,8
2,9	1,1	1,41	1,25	1,3	0,13	3,8	3,8	3,8	3,8	0,00	12,9
3,3	0,8	1,2	1	1,0	0,16	4,1	3,9	4	4,0	0,08	14,3

Lampiran B Tabel 2. 11 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran AEM jarak 1 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	2,3	2,2	2,4	2,3	0,08	3,4	3,5	3,6	3,5	0,08
0,3	2,78	2,76	2,73	2,8	0,02	3,2	3,1	3	3,1	0,08
0,6	3,15	3,21	3,18	3,2	0,02	2,8	2,9	2,7	2,8	0,08
0,9	3,81	3,66	3,8	3,8	0,07	2,4	2,2	2,3	2,3	0,08
1,2	4,01	4,08	3,91	4,0	0,07	2,3	2,2	2,1	2,2	0,08
1,6	4,87	4,76	4,91	4,8	0,06	2	2,1	1,9	2,0	0,08
1,9	5,28	5,24	5,31	5,3	0,03	1,9	2	1,8	1,9	0,08
2,2	5,29	5,39	5,45	5,4	0,07	1,8	2	1,9	1,9	0,08
2,6	6,23	6,69	6,46	6,5	0,19	1,8	2	1,9	1,9	0,08
2,9	7,1	7,04	6,98	7,0	0,05	1,6	1,8	1,7	1,7	0,08
3,3	8,06	8	8,08	8,0	0,03	1,6	1,6	1,6	1,6	0,00

Lampiran B Tabel 2. 12 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran AEM jarak 0,7 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	5,42	5,4	5,44	5,4	0,02	3,8	3,8	3,7	3,8	0,05	11,2
0,3	5,32	5,31	5,32	5,3	0,00	4,62	4,53	4,42	4,5	0,08	11,4
0,6	4,85	4,75	4,93	4,8	0,07	4,69	4,6	4,69	4,7	0,04	11,5
0,9	4,88	4,92	4,86	4,9	0,02	5,14	5,11	5,09	5,1	0,02	11,5
1,2	4,36	4,32	4,4	4,4	0,03	5,23	5,36	5,41	5,3	0,08	11,5
1,6	4,22	4,2	4,28	4,2	0,03	5,71	5,66	5,64	5,7	0,03	11,6
1,9	4,16	4,1	4,13	4,1	0,02	5,87	5,92	5,9	5,9	0,02	11,7
2,2	3,73	3,75	3,78	3,8	0,02	5,9	6,01	6,05	6,0	0,06	11,7
2,6	3,14	3,1	3,18	3,1	0,03	6,2	6,46	6,56	6,4	0,15	12,3
2,9	1,9	2,1	1,76	1,9	0,14	6,8	6,98	6,8	6,9	0,08	12,8
3,3	1,807	1,82	1,7	1,8	0,05	7	6,9	7	7,0	0,05	11,2

Lampiran B Tabel 2. 13 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran AEM jarak 0,7 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	3	3	3,1	3,0	0,05	2,89	3,08	2,96	3,0	0,08
0,3	2,94	3	3,01	3,0	0,03	2,76	2,83	2,98	2,9	0,09
0,6	3,56	3,34	3,43	3,4	0,09	2,65	2,75	2,5	2,6	0,10
0,9	3,8	3,75	3,9	3,8	0,06	2,68	2,53	2,6	2,6	0,06
1,2	4,98	4,87	4,92	4,9	0,04	2,1	2,26	2,32	2,2	0,09
1,6	5,97	6	6,07	6,0	0,04	2,09	2,19	2,11	2,1	0,04
1,9	6,51	6,72	6,67	6,6	0,09	2	2,07	2,13	2,1	0,05
2,2	6,98	7,03	7,08	7,0	0,04	1,98	2,04	2,02	2,0	0,02
2,6	7,12	7,2	7,19	7,2	0,04	1,8	1,99	2	1,9	0,09
2,9	8,76	8,82	8,84	8,8	0,03	1,76	1,89	1,87	1,8	0,06
3,3	9,03	9,12	9,19	9,1	0,07	1,65	1,72	1,7	1,7	0,03

Lampiran B Tabel 2. 14 Nilai TDS dan pH katoda konfigurasi membran AEM jarak 0,2 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH					Tegangan Listrik (Volt)
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	
0,0	2,15	2,16	2,16	2,2	0,00	3,22	3,23	3,22	3,2	0,00	8,9
0,3	2,02	2,01	2,02	2,0	0,00	3,43	3,43	3,42	3,4	0,00	9,4
0,6	1,96	1,95	1,96	2,0	0,00	3,89	3,89	3,88	3,9	0,00	9,8
0,9	1,87	1,88	1,87	1,9	0,00	4	4,01	4,01	4,0	0,00	9,6
1,2	1,77	1,78	1,77	1,8	0,00	4,2	4,21	4,21	4,2	0,00	9,7
1,6	1,7	1,71	1,71	1,7	0,00	4,74	4,76	4,76	4,8	0,01	9,6
1,9	1,45	1,46	1,46	1,5	0,00	5,87	5,89	5,89	5,9	0,01	9,5
2,2	1,42	1,41	1,41	1,4	0,00	6,2	6,21	6,21	6,2	0,00	9,4
2,6	1,3	1,4	1,4	1,4	0,05	7,35	7,34	7,34	7,3	0,00	9,9
2,9	0,8	0,81	0,81	0,8	0,00	8,86	8,85	8,85	8,9	0,00	10,2
3,3	0,72	0,73	0,73	0,7	0,00	8,85	8,84	8,85	8,8	0,00	10,4

Lampiran B Tabel 2. 15 Nilai TDS dan pH anoda konfigurasi membran AEM jarak 0,2 cm

AH/L	Total Dissolved Solids (g/L)					pH				
	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD
0,0	3,54	3,53	3,53	3,5	0,00	3,64	3,62	3,63	3,6	0,01
0,3	3,59	3,58	3,58	3,6	0,00	3,43	3,44	3,43	3,4	0,00
0,6	3,69	3,68	3,68	3,7	0,00	3,29	3,3	3,3	3,3	0,00
0,9	3,72	3,73	3,73	3,7	0,00	3,1	3,11	3,1	3,1	0,00
1,2	3,97	3,96	3,96	4,0	0,00	3,03	3	3,02	3,0	0,01
1,6	4,28	4,25	4,25	4,3	0,01	2,83	2,82	2,82	2,8	0,00
1,9	4,45	4,42	4,42	4,4	0,01	2,81	2,8	2,8	2,8	0,00
2,2	4,79	4,76	4,76	4,8	0,01	2,44	2,44	2,46	2,4	0,01
2,6	5,56	5,53	5,53	5,5	0,01	2,32	2,33	2,33	2,3	0,00
2,9	5,04	5,04	5,04	5,0	0,00	2,22	2,21	2,22	2,2	0,00
3,3	6,1	6,1	6,1	6,1	0,00	1,99	1,9	1,98	2,0	0,04

3. Perhitungan Massa Proses Elektrolisis

Keberhasilan dari proses elektrolisis salah satunya ditentukan dari kesetimbangan massa yang terjadi pada proses elektrolisis, Analisis logam dilakukan dengan ICP secara *triplo*, Hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 3.1- 3,19,

Lampiran B Tabel 3. 2 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi AEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	20,56	20,22	21,96	20,91	0,8
Cu	0,53	0,53	0,28	0,45	0,1
Cr	1,1	0,58	0,64	0,77	0,2
Pb	0,2	0,2	0,3	0,23	0,0
Al	71,41	57,38	69,81	66,20	6,3

Lampiran B Tabel 3. 3 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi AEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	169,5	160,1	158,8	162,80	4,8
Cu	11,75	11,1	12,25	11,70	0,5
Cr	3,8	3,7	3,55	3,68	0,1
Pb	11	9	10	10,00	0,8
Al	3900,75	3812,55	3745,15	3819,48	63,7

Lampiran B Tabel 3. 4 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi AEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	13,23	10,37	10,14	56,23	1,4
Cu	0,72	0,63	0,78	3,55	0,1
Cr	0,02	0,03	0,04	0,15	0,0
Pb	0,7	0,9	1,1	4,50	0,2

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Al	117,48	114,35	111,89	572,87	2,3

Lampiran B Tabel 3. 5 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi CEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	19,76	20,22	19,98	19,99	0,2
Cu	1,2	0,96	1,06	1,07	0,1
Cr	1,37	1,58	1,1	1,35	0,2
Pb	0,49	0,49	0,51	0,50	0,0
Al	37,21	37,82	38,61	37,88	0,6

Lampiran B Tabel 3. 6 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi CEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	181,4	180,9	195,5	185,93	6,8
Cu	11	10,6	11,1	10,90	0,2
Cr	2,3	2,15	2,25	2,23	0,1
Pb	5	4,5	5,5	5,00	0,4
Al	3904,9	4428,35	4271,3	4201,52	219,3

Lampiran B Tabel 3. 7 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi katoda CEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	82,85	79,35	81,55	81,25	1,4
Cu	8,7	9,3	8,1	8,70	0,5
Cr	3,9	3,7	3,55	3,72	0,1

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Pb	8	8	8	8,00	0,0
Al	2422,05	2402,15	2197,1	2340,43	101,7

Lampiran B Tabel 3. 8 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi anoda CEM 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	151,5	155,65	146,65	151,27	3,7
Cu	8,6	9,15	7,1	8,28	0,9
Cr	4,35	4,25	4,05	4,22	0,1
Pb	8	10	10	9,33	0,9
Al	822,5	918,75	818,75	853,33	46,3

Lampiran B Tabel 3. 9 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi tanpa membran 1 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	16,26	15,96	17,62	16,61	0,7
Cu	0,54	0,58	0,65	0,59	0,0
Cr	0,14	0,13	0,12	0,13	0,0
Pb	0,6	0,6	0,9	0,70	0,1
Al	40,32	31,28	34,77	35,46	3,7

Lampiran B Tabel 3. 10 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi tanpa membran 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	175,9	184,15	173,9	177,98	4,4
Cu	8	10,4	11,5	9,97	1,5
Cr	2	2,05	2,25	2,10	0,1

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Pb	7	9	7	7,67	0,9
Al	2586,25	2447,55	2593,75	2542,52	67,2

Lampiran B Tabel 3. 11 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi tanpa membran 1cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	17,68	17,71	18,34	17,91	0,3
Cu	1,19	1,18	1,19	1,19	0,0
Cr	0,53	0,52	0,51	0,52	0,0
Pb	0,9	1	1	0,97	0,0
Al	219,43	186,98	184,31	196,91	16,0

Lampiran B Tabel 3. 12 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi tanpa membran 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	13,26	13,23	13,13	13,21	0,1
Cu	0,33	0,35	0,34	0,34	0,0
Cr	1,49	0,94	1,08	1,17	0,2
Pb	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0
Al	58,05	58,05	57,15	57,75	0,4

Lampiran B Tabel 3. 13 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi tanpa membran 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	11,64	11,64	11,44	11,57	0,6
Cu	0,15	0,16	0,16	0,16	0,0
Cr	1,29	1,20	1,34	1,28	0,1
Pb	0,20	0,20	0,35	0,25	0,0
Al	2298,50	2276,40	2354,90	2309,93	114,9

Lampiran B Tabel 3. 14 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi tanpa membran 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	8,3	8,01	8,11	8,14	0,4
Cu	0,16	0,13	0,17	0,15	0,0
Cr	1,16	1,35	1,19	1,23	0,1
Pb	0,25	0,25	0,3	0,27	0,0
Al	54,05	53,85	54,1	54,00	2,7

Lampiran B Tabel 3. 15 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi tanpa membran 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	2,61	2,75	2,85	2,74	0,1
Cu	0,28	0,26	0,18	0,24	0,0
Cr	0,96	1,01	1,03	1,00	0,0
Pb	0,30	0,35	0,40	0,35	0,0
Al	69,11	70,17	60,27	66,52	4,4

Lampiran B Tabel 3. 16 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi tanpa membran 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	26,77	25,89	25,89	26,18	1,3
Cu	0,36	0,37	0,37	0,36	0,0
Cr	1,32	1,27	1,3	1,29	0,1
Pb	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0
Al	2123,4	2173,2	2164,6	2153,74	106,2

Lampiran B Tabel 3. 17 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi tanpa membran 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	27,74	29,35	26,87	27,98	1,4

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Cu	0,37	0,37	0,38	0,37	0,0
Cr	1,21	1,24	1,11	1,18	0,1
Pb	0,4	0,45	0,4	0,41	0,0
Al	60,38	60,11	60,17	60,22	3,0

Lampiran B Tabel 3. 18 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi AEM 0,7cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	0,39	0,40	0,39	0,39	0,0
Cu	0,11	0,10	10,13	3,45	4,7
Cr	1,05	0,99	1,15	1,06	0,1
Pb	0,30	0,30	0,30	0,30	0,0
Al	61,98	62,85	59,64	61,49	1,4

Lampiran B Tabel 3. 19 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi AEM 0,7cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	29,48	29,36	29,35	29,39	1,5
Cu	0,6	0,58	0,55	0,57	0,0
Cr	8,44	8,78	8,63	8,61	0,4
Pb	0,35	0,45	0,3	0,36	0,0
Al	3285,3	3354,6	3519,8	3386,55	16,43

Lampiran B Tabel 3. 20 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi AEM 0,7cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	0,17	0,18	0,18	0,17	0,0
Cu	0,12	0,11	0,12	0,11	0,0
Cr	1,48	1,43	1,46	1,45	0,1

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Pb	0,35	0,35	0,35	0,35	0,0
Al	50,11	51,79	51,49	51,13	2,5

Lampiran B Tabel 3. 21 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi CEM 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	19,26	18,02	19,26	18,85	0,6
Cu	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cr	0,22	0,21	0,2	0,22	0,21
Pb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Al	51,01	55,65	63,45	51,01	55,65

Lampiran B Tabel 3. 22 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi CEM 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	0,64	0,6	0,64	0,63	0,0
Cu	0,02	0,04	0,03	0,03	0,0
Cr	0,19	0,2	0,21	0,20	0,0
Pb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Al	3185,3	3154,6	3119,75	3153,22	159,3

Lampiran B Tabel 3. 23 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi katoda CEM 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	8,3	8,01	8,11	8,14	0,4
Cu	0,16	0,13	0,17	0,15	0,0
Cr	1,16	1,35	1,19	1,23	0,1
Pb	0,25	0,25	0,3	0,27	0,0
Al	54,05	53,85	54,1	54,00	2,7

Lampiran B Tabel 3. 24 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi anoda CEM 0,7 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	0,14	0,12	0,14	0,133333	0,0
Cu	0,03	0,03	0,03	0,03	0,0
Cr	0,17	0,18	0,2	0,183333	0,0
Pb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Al	37,71	38,11	38,31	38,04333	0.2

Lampiran B Tabel 3. 25 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi CEM 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	13,6	29,11	29,89	48,40	7,5
Cu	0,07	0,06	0,05	0,12	0,0
Cr	0,13	0,11	0,1	0,23	0,0
Pb	0,05	0,05	0,05	0,10	0,0
Al	34,91	35,81	35,71	35,48	0,4

Lampiran B Tabel 3. 26 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi CEM 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	2,84	2,65	0,74	2,08	0,9
Cu	0,07	0,06	0,06	0,06	0,0
Cr	0,11	0,12	0,11	0,11	0,0
Pb	0,05	0,01	0,05	0,04	0,0
Al	3108,24	3122,64	3137,04	3122,64	11,8

**Lampiran B Tabel 3. 27 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi katoda
CEM 0,2 cm**

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	18,8	18,2	18,5	18,5	0,3
Cu	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Cr	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Pb	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Al	109,6	115,2	111,6	112,2	2,3

**Lampiran B Tabel 3. 28 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi anoda
CEM 0,2 cm**

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	1,9	1,8	1,8	1,8	0,0
Cu	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Cr	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Pb	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Al	66,1	74,5	78,4	73,0	5,1

**Lampiran B Tabel 3. 29 Hasil analisis ICP elektroda konfigurasi AEM
0,2 cm**

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	19,86	19,81	19,99	19,77	0,1
Cu	0,11	0,1	0,11	0,21	0,0
Cr	0,19	0,17	0,16	0,35	0,0
Pb	0,05	0,05	0,05	0,10	0,0
Al	89	93,75	92,81	91,85	2,1

Lampiran B Tabel 3. 30 Hasil analisis ICP T₀ konfigurasi AEM 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Cu	0,08	0,07	0,07	0,07	0,0
Cr	0,17	0,16	0,16	0,16	0,0
Pb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0
Al	207,7	214	215,35	212,35	10,4

Lampiran B Tabel 3. 31 Hasil analisis ICP T₁₀ konfigurasi AEM 0,2 cm

Parameter	Simplo (mg/L)	Duplo (mg/L)	Triplo (mg/L)	Rata-rata	SD
Fe	8,26	8,02	8,26	8,18	8,26
Cu	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cr	0,22	0,21	0,2	0,21	0,22
Pb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Al	51,01	55,65	63,45	56,70	51,01

Untuk perhitungan massa dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3,20, sedangkan %*recovery* dapat dilihat pada Tabel 4,21.

Contoh Perhitungan pada konfigurasi membran AEM-1 cm

i. Perhitungan Massa Logam Al pada T₀

- Hasil ICP Al₀ = 3,819,5 mg/L
- Volume filtrat = 1 L
- Massa Al₀ = ICP Al₀ x Volume
= 3,819,5 mg/L x 1 L
= 3,81 g

ii. Perhitungan Massa Logam Al pada elektroda

Perhitungan prosentase logam diperlukan untuk menentukan kandungan parameter Al dibanding dengan parameter *impurities* yang ada pada sampel, Pada elektroda yang telah ditimbang, kemudian dicuci dengan HNO₃ hingga 50mL dan dianalisis, Berikut contoh perhitungannya:

- Berat katoda awal (A) g
 - Berat katoda akhir setelah dioven (B) g
 - Hasil ICP Al = 66,20 mg/L
 - Massa Al = ICP x 50mL
= 66,20 mg/L x 0,05 L
= 3,31 g
 - Massa total = Massa Al+ Fe+ Pb+ Cr+ Cu
= 4,43 g
 - Prosentase Al = $\frac{\text{massa Al}}{\text{massa total}} \times 100\%$
= $\frac{3,31}{4,43} \times 100\% = 74,7\%$
 - Al elektroda = Prosentase Al x (B-A)
= 74,7% x 3,86 g = 2,88 g
- iii. Perhitungan Massa Logam Al pada T₁₀
- Hasil ICP Al₀ = 114,5 mg/L
 - Volume filtrat = 0,9 L
 - Massa Al₀ = ICP Al₁₀ x Volume
= 114,5 mg/L x 0,9 L = 0,10 g
- iv. Perhitungan Massa Logam Al pada presipitat
- Massa presipitat setelah dioven (C) = 1,11 g
 - $\frac{BM \text{ Al}}{BM \text{ Al(OH)}_3} = \frac{27}{78}$
 - Massa presipitat = C x perbandingan BM
= 1,11 g x $\frac{27}{78}$ = 0,83 g
- v. Perhitugan % *recovery*
- Massa Al T₀ = 3,81 g
 - Massa Al elektroda = 2,88 g
 - % *recovery* = $\frac{\text{Massa Al elektroda}}{\text{massa AL } t_0} \times 100\%$
= 75,4%

Lampiran B Tabel 3. 32 Massa Proses Elektrolisis

Variasi	Parameter	T0	% logam	berat katoda (g)	berat logam katoda (g)	berat presipitat (g)	berat logam presipitat (g)	T10 katoda (g)	T10 anoda (g)
		A	B	C	D	E	F	G	H
					B x C				
Tanpa Membran - 1 cm	Fe	0,036	18,1%	2,340	0,424	0,230	0,10	0,02	
	Cu	0,002	0,5%		0,011		0,00	0,00	
	Cr	0,000	1,6%		0,038		0,01	0,00	
	Pb	0,002	0,5%		0,012		0,00	0,00	
	Al	2,543	79,3%		1,855		0,43	0,16	
Tanpa Membran - 0,7 cm	Fe	0,026	25,0%	2,200	0,549	0,530	0,10	0,01	
	Cu	0,000	0,3%		0,007		0,00	0,00	
	Cr	0,001	1,3%		0,028		0,01	0,00	
	Pb	0,000	0,4%		0,010		0,00	0,00	
	Al	2,154	73,0%		1,606		0,42	0,05	

Variasi	Parameter	T0	% logam	berat katoda (g)	berat logam katoda (g)	berat presipitat (g)	berat logam presipitat (g)	T10 katoda (g)	T10 anoda (g)
		A	B	C	D	E	F	G	H
					B x C				
Tanpa Membran - 0,2 cm	Fe	0,036	31,1%	2,030	0,630	1,460	0,36	0,03	
	Cu	0,002	1,1%		0,022		0,00	0,00	
	Cr	0,000	0,2%		0,005		0,02	0,00	
	Pb	0,002	1,3%		0,027		0,01	0,00	
	Al	2,543	66,3%		1,346		1,07	0,06	
CEM - 1 cm	Fe	0,002	63,6%	1,120	0,712	0,210	0,069	0,016	0,027
	Cu	0,000	0,2%		0,002		0,004	0,002	0,001
	Cr	0,000	0,3%		0,003		0,005	0,001	0,001
	Pb	0,000	0,1%		0,001		0,002	0,002	0,002
	Al	3,123	46,6%		0,522		0,131	2,341	0,077
	Fe	0,001	32,9%	1,010	0,332	0,390	0,097	0,009	0,009

Variasi	Parameter	T0	% logam	berat katoda (g)	berat logam katoda (g)	berat presipitat (g)	berat logam presipitat (g)	T10 katoda (g)	T10 anoda (g)
		A	B	C	D	E	F	G	H
					B x C				
CEM-0,7 cm	Cu	0,000	1,8%		0,018		0,000	0,000	0,000
	Cr	0,000	2,2%		0,022		0,002	0,000	0,000
	Pb	0,000	0,8%		0,008		0,001	0,000	0,000
	Al	3,153	62,3%		0,629		0,291	2,122	0,034
CEM - 0,2 cm	Fe	0,002	24,8%	0,980	0,243	0,400	0,254	0,018	0,002
	Cu	0,000	0,1%		0,001		0,001	0,000	0,000
	Cr	0,000	0,6%		0,005		0,001	0,000	0,000
	Pb	0,000	0,1%		0,001		0,001	0,000	0,000
	Al	3,123	74,5%		0,730		0,186	2,070	0,066
AEM - 1 cm	Fe	0,033	23,6%	3,861	0,912	1,090	0,257	0,010	
	Cu	0,002	0,5%		0,019		0,005	0,001	

Variasi	Parameter	T0	% logam	berat katoda (g)	berat logam katoda (g)	berat presipitat (g)	berat logam presipitat (g)	T10 katoda (g)	T10 anoda (g)
		A	B	C	D	E	F	G	H
					B x C				
	Cr	0,001	0,9%		0,034		0,010	0,000	
	Pb	0,002	0,3%		0,010		0,003	0,001	
	Al	3,819	74,7%		2,886		0,815	0,103	
AEM - 0,7 cm	Fe	0,029	21,2%	3,450	0,732	0,980	0,208	0,000	
	Cu	0,001	4,1%		0,141		0,040	0,000	
	Cr	0,009	1,3%		0,044		0,012	0,001	
	Pb	0,000	0,4%		0,012		0,003	0,000	
	Al	3,387	73,1%		2,521		0,716	0,051	
AEM - 0,2 cm	Fe	0,003	30,1%	3,260	0,980	0,850	0,256	0,000	
	Cu	0,000	0,2%		0,005		0,001	0,000	
	Cr	0,000	0,3%		0,009		0,002	0,000	

Variasi	Parameter	T0	% logam	berat katoda (g)	berat logam katoda (g)	berat presipitat (g)	berat logam presipitat (g)	T10 katoda (g)	T10 anoda (g)
		A	B	C	D	E	F	G	H
					B x C				
	Pb	0,000	0,1%		0,002		0,001	0,000	
	Al	3,134	69,4%		2,264		0,590	0,191	

Lampiran B Tabel 3. 33 Recovery Al pada Seluruh Fase

Variasi	% Al T0	% Al elektroda	%Al presipitat	% Al T10 katoda	% Al losses	%Al T10 anoda
Tanpa Membran - 1 cm	100%	75%	20%	3%	4%	

Variasi	% Al T0	% Al elektroda	%Al presipitat	% Al T10 katoda	% Al losses	%Al T10 anoda
Tanpa Membran - 0,7 cm	100%	73%	17%	6%	3%	
Tanpa Membran - 0,2 cm	100%	53%	42%	2%	3%	
CEM - 1 cm	100%	17%	4%	75%	2%	2%
CEM- 0,7 cm	100%	20%	9%	67%	1%	2%
CEM - 0,2 cm	100%	23%	6%	66%	2%	2%
AEM - 1 cm	100%	76%	21%	3%	0%	
AEM - 0,7 cm	100%	74%	21%	2%	3%	
AEM - 0,2 cm	100%	72%	19%	6%	3%	

Lampiran B Tabel 3. 34 Laju Penyisihan Aluminium per Jam

jam operasi	Siplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	SD	Volume pengolahan	massa Al tersisihkan	% removal
0	1377,5	1407,5	1390,5	1391,8	12,28	1	1391,83	-
1	332,3	341,8	338,8	337,6	3,97	0,99	334,21	76%
2	103,1	108,9	101,8	104,6	3,09	0,98	102,46	93%
3	17,1	16,5	16,5	16,7	0,27	0,97	16,17	99%
4	12,4	12,1	11,6	12,0	0,35	0,96	11,52	99%
5	14,3	14,1	14,4	14,2	0,14	0,95	13,52	99%
6	10,8	10,5	10,6	10,6	0,12	0,94	9,95	99%
7	15,1	14,9	16,1	15,3	0,51	0,93	14,26	99%
8	10,4	10,9	10,9	10,7	0,25	0,92	9,84	99%
9	40,4	39,9	38,4	39,6	0,87	0,91	35,99	97%
10	42,9	42,0	42,3	42,4	0,36	0,9	38,16	97%

4. Kandungan Organik

Adanya proses oksidasi pada proses ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai TDS.

Lampiran B Tabel 4. 2 massa COD pada konfigurasi CEM 1 cm pada anoda

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	2	10800	10800	0,3375	0,0	0,0
1	2	10800	10692	0,334125	1,2	0,3
2	2,05	10600	10388	0,324625	2,3	0,6
3	2,05	10600	10282	0,321313	1,9	0,9
4	2,15	10200	9792	0,306	2,7	1,2
5	2,1	10400	9880	0,30875	2,0	1,6
6	2,15	10200	9588	0,299625	2,1	1,9
7	2,2	10000	9300	0,290625	2,2	2,2
8	2,15	10200	9384	0,29325	1,8	2,6
9	2,25	9800	8918	0,278688	2,1	2,9
10	2,2	10000	9000	0,28125	1,8	3,3

Lampiran B Tabel 4. 3 massa COD pada konfigurasi CEM 0,7 cm pada anoda

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	1,85	2800	2800	0,0875	0,0	0
1	2	2200	2178	0,068063	6,95	0,3
2	2	2200	2156	0,067375	3,56	0,6
3	2,15	1600	1552	0,0485	4,55	0,9
4	2,15	1600	1536	0,048	3,42	1,2
5	2,2	1400	1330	0,041563	3,15	1,6
6	2,2	1400	1316	0,041125	2,62	1,9

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
7	2,2	1400	1302	0,040688	2,25	2,2
8	2,1	1800	1656	0,05175	1,49	2,6
9	2,1	1800	1638	0,051188	1,33	2,9
10	2,15	1600	1440	0,045	1,38	3,3

Lampiran B Tabel 4. 4 massa COD pada konfigurasi CEM 0,2 cm pada anoda

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	2,25	1400	1400	0,04375	0,0	0
1	2,3	1200	1188	0,037125	2,37	0,3
2	2,35	1000	980	0,030625	2,32	0,6
3	2,35	1000	970	0,030313	1,57	0,9
4	2,2	1600	1536	0,048	-0,37	1,2
5	2,3	1200	1140	0,035625	0,56	1,6
6	2,3	1200	1128	0,03525	0,48	1,9
7	2,3	1200	1116	0,034875	0,43	2,2
8	2,3	1200	1104	0,0345	0,38	2,6
9	2,35	1000	910	0,028438	0,56	2,9
10	2,35	1000	900	0,028125	0,51	3,3

Lampiran B Tabel 4. 5 massa COD pada konfigurasi tanpa membran 1 cm

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	2,1	6000	6000	0,1875	0,0	0,0
1	2,1	6000	5940	0,185625	0,7	0,3

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
2	2,1	6000	5880	0,18375	0,7	0,6
3	2,15	5800	5626	0,175813	1,4	0,9
4	2,15	5800	5568	0,174	1,2	1,3
5	2,15	5800	5510	0,172188	1,0	1,6
6	2,2	5600	5264	0,1645	1,3	1,9
7	2,2	5600	5208	0,16275	1,2	2,3
8	2,25	5400	4968	0,15525	1,3	2,6
9	2,25	5400	4914	0,153563	1,2	3,0
10	2,25	5400	4860	0,151875	1,1	3,3

Lampiran B Tabel 4. 6 massa COD pada konfigurasi tanpa membran 0,7 cm

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	2,25	9800	9800	0,30625	0,0	0,0
1	2,25	9800	9702	0,303188	1,1	0,3
2	2,3	9600	9408	0,294	2,1	0,6
3	2,35	9400	9118	0,284938	2,5	0,9
4	2,35	9400	9024	0,282	2,1	1,3
5	2,3	9600	9120	0,285	1,4	1,6
6	2,3	9600	9024	0,282	1,4	1,9
7	2,3	9600	8928	0,279	1,3	2,3
8	2,3	9600	8832	0,276	1,2	2,6
9	2,3	9600	8736	0,273	1,2	3,0
10	2,35	9400	8460	0,264375	1,3	3,3

Lampiran B Tabel 4. 7 massa COD pada konfigurasi tanpa membran 0,2 cm

jam	mL titran	COD (mg/L)	mg COD	mol/L	ICE	Ah/L
0	2	10400	10400	0,325	0,0	0,0
1	2	10400	10296	0,32175	1,1	0,3
2	2,05	10200	9996	0,312375	2,2	0,6
3	2	10400	10088	0,31525	1,1	0,9
4	1,95	10600	10176	0,318	0,6	1,3
5	2,05	10200	9690	0,302813	1,5	1,6
6	2	10400	9776	0,3055	1,1	1,9
7	2,05	10200	9486	0,296438	1,4	2,3
8	2	10400	9568	0,299	1,1	2,6
9	2,15	9800	8918	0,278688	1,7	3,0
10	2,1	10000	9000	0,28125	1,4	3,3

5. Kebutuhan Energi

Pendekatan perhitungan kebutuhan energi dengan ICE. Hasil ICE dapat dilihat pada Lampiran B Tabel 5.- Tabel 5.3. **Contoh Perhitungan** ICE pada konfigurasi tanpa membran-1 cm adalah sebagai berikut:

i. ICE reduksi

- $Al\ T_0 = 2,53\ g$
- $Al\ T_{10} = 0,16\ g$
- $Mol/L\ T_0 = \frac{Al\ (g)}{Mr\ AL} = \frac{2,53}{23} = 0,11\ mol/L$
- $Mol/L\ T_{10} = \frac{Al\ (g)}{Mr\ AL} = \frac{0,16}{23} = 0,007\ mol/L$
- $ICE = \frac{3 \times F \times V \times [(Al)t - (Al)t + \Delta t]}{I \times \Delta t}$
 $= \frac{3 \times 96500 \times 1 \times [0,11 - 0,007]}{0,3 \times 10\ jam \times 3600\ jam/det}$
 $= 0,27$

ii. ICE oksidasi dengan COD

- $COD T_0 = 6 \text{ g}$
- $COD T_{10} = 5,4 \text{ g}$
- $Mol/L T_0 = \frac{Al (g)}{Mr O_2} = \frac{6}{32} = 0,188 \text{ mol/L}$
- $Mol/L T_{10} = \frac{Al (g)}{Mr O_2} = \frac{5,4}{32} = 0,169 \text{ mol/L}$
- ICE
$$= \frac{4 \times F \times V \times [(COD)t - (COD)t + \Delta t]}{I \times \Delta t}$$
$$= \frac{4 \times 96500 \times 1 \times [0,188 - 0,169]}{0,3 \times 10 \text{ jam} \times 3600 \text{ jam/det}} = 0,67$$

iii. ICE oksidasi TOC

- $TOC T_0 = 0,296 \text{ g}$
- $TOC T_{10} = 0,266 \text{ g}$
- $Mol/L T_0 = \frac{TOC (g)}{Mr C} = \frac{0,296}{12} = 0,025 \text{ mol/L}$
- $Mol/L T_{10} = \frac{TOC (g)}{Mr C} = \frac{0,266}{12} = 0,022 \text{ mol/L}$
- ICE
$$= \frac{4 \times F \times V \times [(TOC)t - (TOC)t + \Delta t]}{I \times \Delta t}$$
$$= \frac{4 \times 96500 \times 1 \times [0,025 - 0,022]}{0,3 \times 10 \text{ jam} \times 3600 \text{ jam/det}} = 0,047$$

Lampiran B Tabel 5. 1 ICE Reduksi Aluminium

	T0 (g)	T10 (g)	mol/L T0	mol/L T10	ICE
Tanpa membran-1	2.543	0.164	0.111	0.007	0.277
Tanpa membran-0,7	2.154	0.054	0.094	0.002	0.245

	T0 (g)	T10 (g)	mol/L T0	mol/L T10	ICE
Tanpa membran-0,2	2.543	0.060	0.111	0.003	0.289
CEM-1	3.123	0.077	0.136	0.003	0.355
CEM-0,7	3.153	0.034	0.137	0.001	0.364
CEM-0,2	3.123	0.066	0.136	0.003	0.356
AEM-1	3.819	0.103	0.166	0.004	0.433
AEM-0,7	3.387	0.051	0.147	0.002	0.389
AEM-0,2	3.134	0.191	0.136	0.008	0.343

Lampiran B Tabel 5. 2 ICE Oksidasi dengan COD

	T0 (g)	T10 (g)	mol/L T0	mol/L T10	ICE
AEM-1	6,000	5,400	0,188	0,169	0,670
AEM-0,7	3,400	3,000	0,106	0,094	0,447
AEM-0,2	2,600	2,400	0,081	0,075	0,223
CEM-1	1,200	1,000	0,038	0,031	0,223
CEM-0,7	2,800	1,600	0,088	0,050	1,340
CEM-0,2	1,400	1,000	0,044	0,031	0,447
Tanpa membran-1	6,000	5,400	0,188	0,169	0,670
Tanpa membran-0,7	9,800	8,460	0,306	0,264	1,497

	T ₀ (g)	T ₁₀ (g)	mol/L T ₀	mol/L T ₁₀	ICE
Tanpa membran-0,2	10,400	9,000	0,325	0,281	1,564

Lampiran B Tabel 5. 3 ICE Oksidasi dengan TOC

	T ₀	T ₁₀	mol/L T ₀	mol/L T ₁₀	ICE
AEM-1	0,296	0,266	0,025	0,012	0,047
AEM-0,7	0,296	0,274	0,025	0,012	0,046
AEM-0,2	0,296	0,281	0,025	0,012	0,044
CEM-1	0,296	0,256	0,025	0,011	0,048
CEM-0,7	0,296	0,237	0,025	0,010	0,051
CEM-0,2	0,296	0,225	0,025	0,010	0,053
Tanpa membran-1	0,296	0,151	0,025	0,007	0,065
Tanpa membran-0,7	0,296	0,189	0,025	0,008	0,059
Tanpa membran-0,2	0,296	0,192	0,025	0,008	0,058

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN

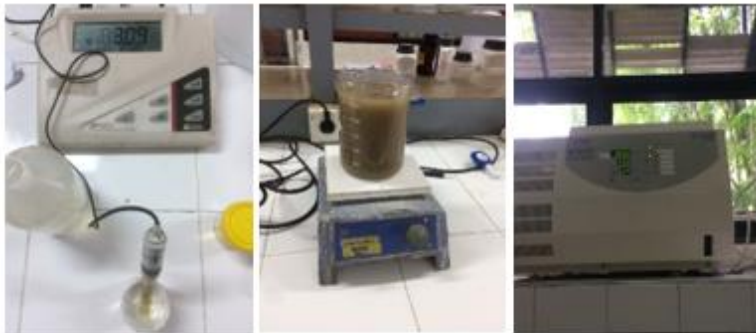


(a)

(b)

(c)

Lampiran C Gambar 1. 1 (a) Pengambilan sampel lumpur PDAM X. (b) Pengeringan Lumpur (c) Penumbukkan dan Pengayakan Lumpur Kering



(d)

(e)

(f)

Lampiran C Gambar 1. 2 (d) Pemberian H_2SO_4 dengan pH3 (e) Proses Asidifikasi dengan *Magnetic Stirer* (f) Proses Sentrifugasi Sampel



Lampiran C Gambar 1. 3 Pengoperasian Reaktor Elektrolisis dengan membran AEM



(g)



(h)



(i)

Lampiran C Gambar 1. 4 (g) Membran AEM setelah Operasi (h) Analisis COD (i) Katoda setelah Operasi

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 14 November 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Kaliasin I Surabaya (2002-2008), SMPN 3 Surabaya (2008-2011) dan SMAN 2 Surabaya (2011-2014). Pada tahun 2014, penulis melanjutkan kuliah di Teknik Lingkungan FTSLK Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis juga aktif sebagai Asistensi

Laboratorium Kimia Lingkungan I dan Kimia Lingkungan II. Penulis pernah aktif sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2016-2017 sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar. Penulis dapat dihubungi melalui surel di adipuspitarini@gmail.com.